

DOI: 10.15593/2499-9873/2020.2.06

УДК 681.511.42

М.И. Васильев^{1,2}, С.М. Андреев², И.И. Васильев^{2,3}

¹ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией», Москва, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

³ООО «Газпром добыча Уренгой», Новый Уренгой, Россия

РЕГУЛЯТОР ПОДАЧИ ВОЗДУХА В РАБОЧЕЕ ПРОСТРАНСТВО ТЕПЛОЙ УСТАНОВКИ, ОСНОВАННЫЙ НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ

Смоделирован процесс горения в рабочем пространстве тепловой установки. Показана статическая характеристика зависимости расхода топлива от расхода воздуха в условиях стабилизации теплоты, образующейся в результате процесса горения, следовательно, доказана возможность оптимизации данного процесса. Разработаны структурная схема, математическая модель и алгоритм расчета энергосберегающего нечеткого управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки. Составлены функции принадлежности нечетких множеств для входных лингвистических переменных. Сформулированы базы правил с учетом статической характеристики объекта управления. Приведены примеры технологического и лингвистического обоснования правил нечеткого регулятора. Определена динамика изменения регулируемого параметра за счет решения двух дифференциальных уравнений. Осуществлен поиск уровней «отсечений» для предпосылок каждого из правил с использованием операции «минимум» в соответствии с составленной базой правил. Произведена процедура дефаззификации (приведение к четкости). Показаны преимущества данной системы перед традиционными стабилизирующими системами управления в условиях действия множества случайных факторов и существенно нелинейной связи между входными и выходными величинами. Определены оптимальные значения коэффициентов масштабирования для разработанной системы автоматического управления. Рассмотрен пример формирования управляющего воздействия при реализации нечеткого энергосберегающего управления процессом горения в рабочем пространстве котельной установки № 3 ГКП-1А УГПУ ООО «Газпром добыча Уренгой». Выполнены расчеты количества подсосываемого атмосферного воздуха, избытка и расхода воздуха, площади сечения трубы подачи воздуха, суммарного расхода воздуха в рабочее пространство тепловой установки, объема природного газа, принявшего участие в процессе горения; теплоты, полученной в результате горения, количества воздуха, не принявшего участия в процессе горения; количества тепла, необходимого для увеличения температуры избыточного воздуха до средней температуры дымовых газов; оставшейся теплоты реакции горения, изменения концентрации кислорода в отходящих дымовых газах в зависимости от расхода воздуха на горелку. Методом аппроксимации исходных данных режимной карты парового котла построена функциональная зависимость температуры дымовых газов от расхода природного газа. Динамические свойства инерционного с запаздыванием управляемого процесса учитываются при использовании метода Эйлера. Оценено влияние режима управления процессом горения на величину удельного расхода топлива. Оценены эффекты от применения системы с нечетким регулированием в части экономии природного газа и электроэнергии во всем диапазоне производительности тепловой установки.

Ключевые слова: процесс горения, тепловая установка, нечеткое управление, энергосберегающее управление, лингвистическая переменная, функции принадлежности, степень истинности, нечеткие множества, нечеткие алгоритмы, эвристические правила.

M.I. Vasil'ev^{1,2}, S.M. Andreev², I.I. Vasil'ev^{2,3}

¹Inter RAO – Management of Electric Power Plants LLC,
Moscow, Russian Federation

²Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russian Federation

³Gazprom добыча Уренгой LLC, Novy Urengoy, Russian Federation

AIR SUPPLY REGULATOR FOR THE WORKING SPACE HEAT INSTALLATION BASED ON FUZZY LOGIC

The combustion process in the working space of a heat installation is simulated. The static characteristic of the dependence of fuel consumption on air consumption in the conditions of stabilization of heat generated as a result of the combustion process is shown, therefore, the possibility of optimizing this process is proved. A block diagram, mathematical model and algorithm for calculating energy-saving fuzzy control of the combustion process in the working space of a thermal installation are developed. Combustion Membership functions of fuzzy sets for input linguistic variables are compiled. The rule bases are formulated taking into account the static characteristics of the control object. Examples of technological and linguistic justification of fuzzy controller rules are given. The dynamics of changing the controlled parameter is determined by solving two differential equations. The search for levels of "cut-offs" for the prerequisites of each of the rules using the "minimum" operation in accordance with the compiled database of rules is performed. The defuzzification procedure was performed (bringing it to clarity). The advantages of this system over traditional stabilizing control systems under the action of a set of random factors and a significantly nonlinear relationship between input and output values are shown. Optimal values of scaling factors for the developed automatic control system are determined. Let's consider an example of the formation of a control effect when implementing fuzzy energy-saving control of the combustion process in the working space of the boiler unit No. 3 of the GKP-1A UGPU of Gazprom добыча Уренгой LLC. The calculations of the amount of leakage of atmospheric air, excess air flow, the sectional area of the pipe supplying air, the total air flow in the working space of the thermal installation, the volume of natural gas participating in the combustion process, heat resulting from the combustion, the amount of air that did not participate in the combustion process, the amount of heat required to increase the temperature of excess air until the average temperature of the flue gas remaining heat of the combustion reaction, changes in the oxygen concentration in the exhaust flue gases depending on the air flow to the burner. The functional dependence of the flue gas temperature on the natural gas consumption is constructed by approximating the initial data of the regime map of the steam boiler. The dynamic properties of an inertia-delayed controlled process are taken into account when using the Euler method. The combustion control mode influence on the specific fuel consumption is estimated. The effects of using a system with fuzzy control in terms of saving natural gas and electricity over the entire range of performance of a thermal installation are estimated.

Keywords: combustion process, heat installation, fuzzy control, energy-saving control, linguistic variable, membership functions, truth degree, fuzzy sets, fuzzy algorithms, heuristic rules.

1. Актуальность работы

Режим управления процессом горения в рабочем пространстве тепловых установок оказывает влияние на величину удельного расхода топлива, сохранность технологических агрегатов и экологические условия.

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

В работе [1] предлагается осуществлять управление процессом горения за счет стабилизации заданного значения давления в рабочем пространстве тепловой установки. Однако в условиях ограниченных возможностей дымоотводящей системы на большинстве нагревательных промышленных печей существует ограничение на реализуемость энергосберегающего управления газодинамическим режимом при максимальных тепловых нагрузках.

В работе [2] представлен способ энергосберегающего управления процессом горения за счет изменения положения дымового клапана (мощности дымососа). Данный способ в «крайних» режимах работы ввиду дестабилизации (изменения) давления в рабочем пространстве тепловой установки приводит к нарушению технологического режима (срыву пламени с горелки), что, в свою очередь, может отрицательно сказаться на сохранности технологических агрегатов.

Исходя из анализа выводов вышеуказанных работ задачей оптимизации процесса горения является поддержание коэффициента расхода воздуха равным заданному посредством измерения концентрации кислорода в отходящих дымовых газах и дальнейшего регулирования расхода воздуха в рабочее пространство тепловой установки.

2. Основные проблемы и решения

В условиях действия множества случайных факторов, наличия существенно нелинейных связей между параметрами процесса и прочего 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 тепловых установок.

В таких сложных условиях для управления процессом эффективнее использовать системы автоматического управления, принцип действия которых основан на теории нечетких множеств и нечеткой логике [3].

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 «Если есть ситуация, тогда нужно такое управление» [4].

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 [5].

Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки представлена на рис. 1.

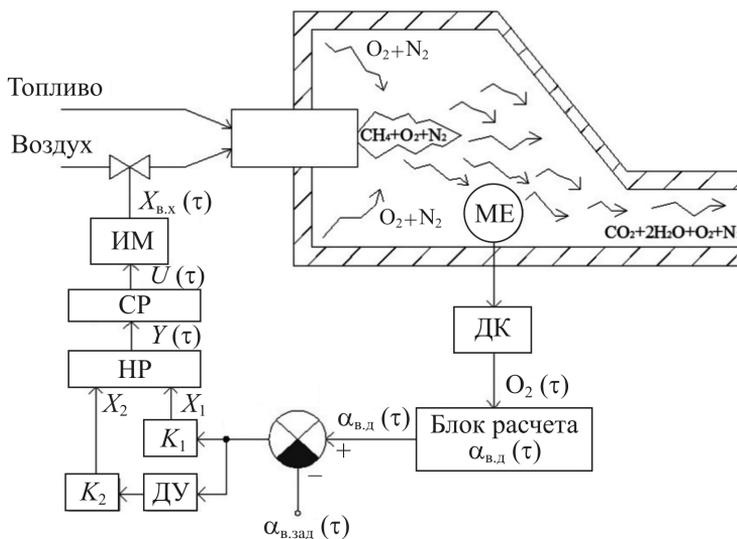


Рис. 1. Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки

Текущее значение содержания кислорода в рабочем пространстве тепловой установки $O_2(\tau)$ измеряется датчиком (ДК) и подается на блок расчета текущего значения $\alpha_{в.д}(\tau)$ [6].

На выходе элемента сравнения (ЭС) формируется сигнал рассогласования между текущим значением коэффициента расхода воздуха и его заданным значением:

$$\varepsilon(\tau) = \alpha_{в.д}(\tau) - \alpha_{в.зад}(\tau),$$

который масштабируется в блоке K_1 и дифференцируется блоком ДУ.

На вход нечеткого регулятора (НР) подается два нормированных сигнала

$$x_1 = K_1 \varepsilon(\tau) \quad \text{и} \quad x_2 = K_2 \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}.$$

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 изменения 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 $\mu(x)$ фиксируется по оси функций.

В области определения предметной переменной X_1 использовано пять нечетких множеств $\mu(x_1)$, определяющих 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 .

Выберем все функции принадлежности таким образом, чтобы они равномерно покрывали всю область изменения входных переменных.

Используем S-функции для $A_1^{X_i}$, где $i=1,2$, в виде выражения

$$A_1^{X_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i > 1; \\ 1,25X_i - 0,25, & \text{если } 0,2 \leq X_i \leq 1; \\ 0, & \text{если } X_i < 0,2. \end{cases}$$

Используем функции Л-вида для представления $A_2^{(X_i)}$, $A_3^{X_i}$, $A_4^{X_i}$:

$$A_2^{X_i} = \begin{cases} -\frac{7}{5}X_i + \frac{17}{10}, & \text{если } 0,5 \leq X_i \leq 1; \\ \frac{10}{7}X_i + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,2 \leq X_i \leq 0,5; \\ 0, & \text{если } X_i < -0,2; \end{cases}$$

$$A_3^{X_i} = \begin{cases} -1,25X_i + 1, & \text{если } 0 < X_i < 0,8; \\ 1,25X_i + 1, & \text{если } -0,8 \leq X_i \leq 0; \\ 0, & \text{если } X_i > 0,8 \text{ или } X_i < -0,8; \end{cases}$$

$$A_4^{X_i} = \begin{cases} -\frac{10}{7}X_i + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,5 \leq X_i \leq 0,2; \\ \frac{7}{5}X_i + \frac{17}{10}, & \text{если } -1 \leq X_i \leq -0,5; \\ 0, & \text{если } X_i > 0,2. \end{cases}$$

Для отражения функций $A_5^{X_i}$ используем Z-функцию в виде

$$A_5^{X_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i < -1; \\ -1,25X_i - 0,25, & \text{если } -1 \leq X_i \leq -0,2; \\ 0, & \text{если } X_i > -0,2. \end{cases}$$

Графические изображения функций принадлежности нечетких множеств $\mu(x_i)$ для входных переменных представлены на рис. 2. Из графика видно, что для фаззификации выбраны треугольные функции

(S, Л и Z). Функции растут по мере приближения к заданной величине и уменьшаются по мере удаления. Однако фазсификация «честными» треугольными функциями может приводить к тому, что при выходе величины за диапазон определения функций мы получаем 0 для всех термов, что, в свою очередь, может приводить к отсутствию воздействия на объект, поэтому «крайние» лингвистические термы (S- и Z-функции) за пределами заданного интервала сохраняют значение единицы.

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности B_i при $i=1...5$: B_1 – положительное большое; B_2 – положительное малое; B_3 – нулевое; B_4 – отрицательное малое; B_5 – отрицательное большое.

При формировании базы правил для реализации нечеткого управления принято основное эвристическое правило, определяющее стратегию качественного управления [7, 8].

Это правило формулируется следующим образом:

«Если возникает рассогласование $\varepsilon(\tau)$, тогда необходимо управляющее воздействие, обеспечивающее устранение возникшего 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».

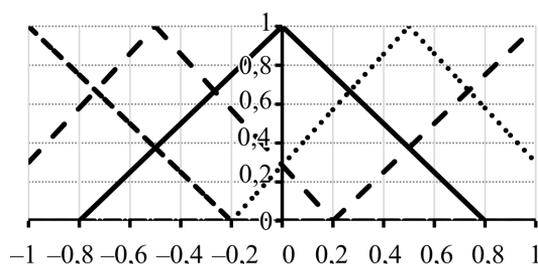


Рис. 2. Функции принадлежности нечетких множеств для входных переменных:

..... A_1 ; A_2 ; — A_3 ; - · - A_4 ; - - - A_5

Функционирование системы энергосберегающего управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки определяется следующей базой правил:

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

Каждое правило может быть технологически и лингвистически обосновано следующим образом.

R_1 : «Если скорость изменения рассогласования практически нулевая и возникло большое отрицательное рассогласование, то на выходе нечеткого регулятора должно быть сформировано управляющее воздействие в направлении открытия клапана расхода воздуха “положительное большое” для устранения значительного недожога».

R_{10} : «Если скорость изменения рассогласования небольшая положительная, но рассогласование текущего значения регулируемого параметра с заданным отсутствует, на выходе нечеткого регулятора должно быть сформировано управляющее воздействие в направлении закрытия клапана расхода воздуха “отрицательное малое” для предотвращения возникновения избытка воздуха в рабочем пространстве тепловой установки».

При формулировке базы правил обязательно следует учитывать два важных обстоятельства: условия формирования сигнала рассогласования $\varepsilon(\tau)$ на элементе сравнения ЭС и вид статической зависимости управляемого параметра от управляющего воздействия [9–12].

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

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } Y(\tau) > \frac{\Delta Y_H}{2}, \text{ при } \varepsilon(\tau) < 0 - \text{откр. (недожог)}; \\ 0, & \text{если } \left(-\frac{\Delta Y_H}{2}\right) \leq Y(\tau) \leq \frac{\Delta Y_H}{2}; \\ -1, & \text{если } Y(\tau) < \left(-\frac{\Delta Y_H}{2}\right), \text{ при } \varepsilon(\tau) > 0 - \text{закр. (избыток } O_2); \end{cases}$$

при $\varepsilon(\tau) = \alpha_{\text{в.д}}(\tau) - \alpha_{\text{в.зад}}(\tau)$,

где ΔY_H – заданная зона нечувствительности системы нечеткого управления; $U(\tau) \in (+1, 0, -1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление движения исполнительного механизма (ИМ).

Алгоритм работы и математическая модель данного нечеткого регулятора были описаны в статьях [13, 14].

Исполнительный механизм функционирует в соответствии с выражением

$$x_{\text{вх}}(\tau) = x_{\text{вх}}(\tau - 1) + U(\tau) \bar{K}_{\text{им}} \tau_{\text{д}},$$

где $x_{\text{вх}}(\tau)$ – текущее положение ИМ; $x_{\text{вх}}(\tau - 1)$ – положение ИМ в прошлый момент времени; $\bar{K}_{\text{им}}$ – средняя скорость ИМ; $\tau_{\text{д}}$ – время дискретизации системы регулирования.

Рассмотрим пример формирования управляющего воздействия $Y(\tau)$ при реализации нечеткого энергосберегающего управления процессом горения в рабочем пространстве котельной установки № 3 ГКП-1А УГПУ ООО «Газпром добыча Уренгой».

Допустим, что в начальный момент времени $\tau = 0$ процесс находится в неустановившемся состоянии при следующих условиях: расход природного газа $422 \text{ м}^3/\text{ч}$; расход воздуха $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $x_{\text{вх}}(\tau = 0) = 20\%$ хода ИМ; температура воздуха, подаваемого на горелку, $30 \text{ }^\circ\text{C}$; низшая теплота сгорания $35\,341,03 \text{ кДж/м}^3$; концентрация кислорода в атмосферном воздухе

21%; расчетный коэффициент $L_0 = 1 \cdot 2 \cdot \frac{100\%}{21\%} = 9,524$; количество теплоты, необходимой на обогрев одного кубометра воздуха на один градус Цельсия, $0,000\,001\,298\,071 \text{ ГДж/м}^3 \cdot ^\circ\text{С}$.

Для определения примерного количества подсасываемого атмосферного воздуха произведем расчет по исходным данным (из режимной карты), представленным в табл. 1.

Избыток и расход воздуха были подсчитаны с помощью перемножения расхода газа на коэффициент расхода воздуха за вычетом единицы и соответственно перемножением расхода воздуха на коэффициент расхода воздуха.

Таблица 1

Исходные данные из режимной карты парового котла № 3
(ДЕ-16-14, стац. № 3, инв. № 211123) ГКП-1А УГПУ
ООО «Газпром добыча Уренгой»

№ п/п	Параметр	Значение				
		300	422	540	650	1020
1	Расход газа, м ³ /ч	300	422	540	650	1020
2	Коэффициент расхода воздуха за котлом	1,36	1,32	1,24	1,22	1,19
3	Избыток воздуха, м ³ /ч	1033,49	1292,25	1240,19	1368,42	1854,546
4	Расход воздуха (полный), м ³ /ч	3885,79	5330,53	6407,66	7588,52	11 615,31
5	Давление воздуха перед горелкой, кгс/м ²	10	20	34	45	82

Рассчитаем для каждого из режимов примерную площадь сечения трубы подачи воздуха (табл. 2) по формуле

$$S = F_{\text{возд}} / \left(\sqrt{2 \cdot \frac{P_{\text{перед горелкой}}}{\rho_{\text{возд}}}} \right),$$

где S – площадь сечения трубы подачи воздуха в горелку; $P_{\text{перед горелкой}}$ – давление воздуха перед горелкой; $\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха при нормальных условиях (высота уровня моря, атмосферное давление 101,325 кПа, температура окружающего воздуха 30 °С).

Выбираем площадь сечения чуть меньше минимального значений (837), потому что необходимо оставлять запас расхода воздуха на подсосы, которые присутствуют в любом режиме (расход воздуха (полный) должен быть всегда больше расхода воздуха через трубу с фиксированной площадью сечения).

Таблица 2

Расчет примерной площади сечения трубы подачи воздуха

Режим работы котла	1	2	3	4	5
Площадь сечения трубы	937,56	909,48	838,49	863,15	978,72

Определим расход воздуха через трубу при фиксированной площади сечения

$$F_{\text{возд. через трубу}} = S \cdot \sqrt{2P_{\text{перед горелкой}} / \rho_{\text{возд}}}$$

тогда величину подсосов атмосферного воздуха можно определить как

$$F_{\text{возд. подс}} = F_{\text{возд}} - F_{\text{возд. через трубу}}$$

Для второго режима работы котла величина подсосов воздуха составляет

$$F_{\text{возд. подс}} = 5330,53 \text{ м}^3/\text{ч} - 4905,74 \text{ м}^3/\text{ч} = 424,79 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Система управления характеризуется следующими параметрами: заданное значение коэффициента расхода воздуха $\alpha_{\text{в.зад}}(\tau) = 1,05$; постоянная скорость перемещения исполнительного механизма $\bar{K}_{\text{им}} = 5\%$ хода ИМ/с; постоянная времени $T_{\text{ог}} = 1$ с; время запаздывания $\tau_3 = 0,2$ с; средний коэффициент передачи объекта $\bar{K}_{\text{об}} = 0,002 \frac{\alpha_{\text{в.д}}}{\% \text{ хода ИМ}}$; величина зоны нечувствительности сигнуреле $\Delta Y_{\text{н}} = 0,01$.

Дискретность расчета принимаем $\tau_{\text{д}} = 0,05$ с.

Динамические свойства инерционного с запаздыванием управляемого процесса учитываются при использовании метода Эйлера [15]:

$$\frac{dq_{O_2} 1(\tau-1)}{d\tau} = \frac{1}{T_{об}} \cdot [q_{O_2} 2(\tau-1) - q_{O_2} 1(\tau-1)];$$

$$q_{O_2} 1(\tau) = q_{O_2} 1(\tau-1) + \frac{q_{O_2} 1(\tau-1)}{d\tau};$$

$$\frac{dq_{O_2}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{\tau_3} [q_{O_2} 1(\tau) - q_{O_2}(\tau)];$$

$$q_{O_2}(\tau+1) = q_{O_2}(\tau) + \frac{q_{O_2}(\tau)}{d\tau}.$$

Здесь $T_{об}$, τ_3 – постоянные времени, количественно характеризующие инерционность и запаздывание соответственно; τ , $\tau+1$ и $\tau-1$ – текущий, последующий и предыдущий моменты времени соответственно; $q_{O_2}(\tau)$, $q_{O_2} 1(\tau)$ и $q_{O_2} 2(\tau)$ – текущее значение концентрации кислорода в отходящих дымовых газах с учетом инерционности и запаздывания, только инерционности и без учета инерционности и запаздывания соответственно.

Для начала определим суммарный расход воздуха в рабочее пространство тепловой установки в начальный момент времени:

$$F_{\Sigma \text{возд}}(\tau) = F_{\text{возд}}(\tau) + F_{\text{возд. подс}}(\tau),$$

где $F_{\Sigma \text{возд}}(\tau)$ – суммарный расход воздуха, м³/ч; $F_{\text{возд}}(\tau)$ – расход воздуха через горелку, м³/ч; $F_{\text{возд. подс}}(\tau)$ – расход через подсосы атмосферного воздуха, м³/ч.

$$F_{\Sigma \text{возд}}(\tau) = 425 \text{ м}^3/\text{ч} + 1000 \text{ м}^3/\text{ч} = 1423 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Рассчитаем расход воздуха за период дискретизации системы управления:

$$V_{\text{возд}}(\tau) = \left(\frac{F_{\Sigma \text{возд}}(\tau)}{3600} \right) \tau_d;$$

$$V_{\text{возд}}(\tau) = \left(\frac{1423 \text{ м}^3/\text{ч}}{3600 \text{ с}} \right) \cdot 0,25 \text{ с} = 0,0198 \text{ м}^3/\tau_d.$$

По аналогичной формуле определим расход природного газа за период дискретизации системы управления:

$$V_{\text{газа}}(\tau) = \left(\frac{F_{\text{газа}}(\tau)}{3600} \right) \tau_{\text{д}},$$

$$V_{\text{газа}}(\tau) = \left(\frac{422 \text{ м}^3/\text{ч}}{3600 \text{ с}} \right) \cdot 0,05 \text{ с} = 0,0057 \text{ м}^3/\tau_{\text{д}}.$$

Зная количество воздуха и газа в рабочем пространстве тепловой установки в единицу времени (период дискретизации), определим, сколько всего природного газа приняло участие в процессе горения:

$$V_{\text{газа, принявш. уч}}(\tau) = \begin{cases} V_{\text{газа}}(\tau), & \text{если } V_{\text{газа}}(\tau)L_0 < V_{\text{возд}}(\tau); \\ \frac{V_{\text{возд}}(\tau)}{L_0}, & \text{если } V_{\text{газа}}(\tau)L_0 \geq V_{\text{возд}}(\tau); \end{cases}$$

$$V_{\text{газа, принявш. уч}}(\tau) = \frac{0,0198 \text{ м}^3 / \tau_{\text{д}}}{9,524} = 0,00208 \text{ м}^3/\tau_{\text{д}},$$

так как $0,0057 \cdot 9,524 > 0,0198$.

Из предыдущего расчета видно, что исходного количества воздуха не хватает для полного сжигания газа.

Теплота, полученная в результате горения, определяется по формуле

$$Q_{\text{в рез-те гор}}(\tau) = Q_{\text{низш. гор}}(\tau) \cdot V_{\text{газа, принявш. уч}}(\tau),$$

где $Q_{\text{низш. гор}}(\tau)$ – низшая теплота сгорания природного газа.

$$Q_{\text{в рез-те гор}}(\tau) = 35341,03 \text{ кДж/м}^3 \cdot 0,00208 \text{ м}^3/\tau_{\text{д}} = 73,509 \text{ кДж}/\tau_{\text{д}}.$$

Количество воздуха, не принявшего участия в процессе горения, можно определить с помощью выражения

$$V_{\text{возд, не принявш. уч}}(\tau) = \begin{cases} V_{\text{возд}}(\tau) - V_{\text{газа}}(\tau)L_0, & \text{если } V_{\text{возд}}(\tau) - V_{\text{газа}}(\tau)L_0 > 0; \\ 0, & \text{если } V_{\text{возд}}(\tau) - V_{\text{газа}}(\tau)L_0 \leq 0; \end{cases}$$

$$V_{\text{возд, не принявш. уч}}(\tau) = 0 \text{ м}^3/\tau_{\text{д}}, \text{ так как } 0,0198 - 0,0057 \cdot 9,524 < 0.$$

В тех случаях, когда есть избыток воздуха, необходимо определить, сколько он заберет тепла на увеличение собственной температуры до средней температуры дымовых газов:

$$Q_{\text{на обогрев возд}}(\tau) = Q_{\text{тепл. на возд}} \cdot V_{\text{возд, не принявш. уч}}(\tau) \cdot (T_{\text{д.г}}(\tau) - T_{\text{возд}}(\tau)),$$

где $Q_{\text{тепл. на возд}}$ – количество теплоты, необходимой на обогрев одного кубометра воздуха на один градус Цельсия, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{°C}$; $T_{\text{возд}}(\tau)$ – температура воздуха, подаваемого на горелку, °C ; $T_{\text{д.г}}(\tau)$ – температура дымовых газов, °C .

Температура дымовых газов имеет функциональную зависимость от расхода природного газа. Данная зависимость построена из исходных данных режимной карты парового котла № 3 (ДЕ-16-14, стац. № 3, инв. № 211123) ГКП-1А УГПУ ООО «Газпром добыча Уренгой» (рис. 3).

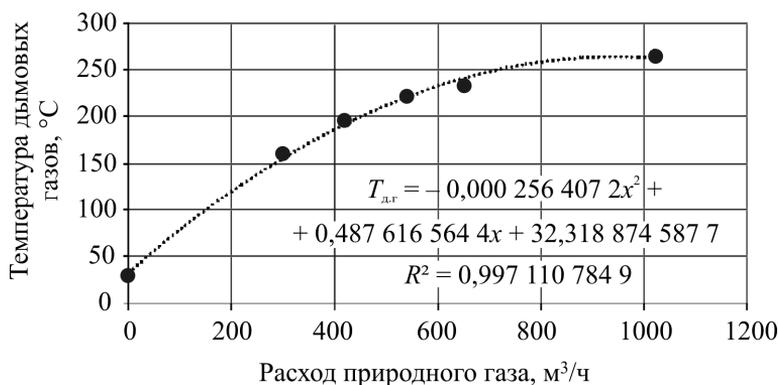


Рис. 3. Экспериментальная зависимость температуры дымовых газов от расхода природного газа

В результате аппроксимации зависимости температуры дымовых газов от расхода природного газа было получено уравнение

$$T_{\text{д.г}}(F_{\text{газа}}(\tau)) = -0,000\,256\,407\,2F_{\text{газа}}(\tau) + 0,487\,616\,564\,4F_{\text{газа}}(\tau) + 32,319.$$

В нашем случае количество теплоты, необходимой на обогрев избытка воздуха, будет равно нулю, поскольку нет избытка воздуха.

Задачей системы нечеткого регулирования расхода воздуха по концентрации кислорода в отходящих дымовых газах является минимизация тепловых потерь с избытком воздуха. Оценить работы нечеткого регулирования можно по оставшейся теплоте реакции горения:

$$Q_{\text{оставш}}(\tau) = Q_{\text{в рез-те гор}}(\tau) - Q_{\text{на обогрев возд}}(\tau);$$

$$Q_{\text{оставш}}(\tau) = 73,509 \text{ кДж}/\tau_{\text{д}} - 0 = 73,509 \text{ кДж}/\tau_{\text{д}}.$$

В процессе горения в отходящих дымовых газах изменяется концентрация кислорода в зависимости от расхода воздуха на горелку:

$$q_{\text{O}_2} 2(\tau) = \frac{V_{\text{возд, не принявш. уч}}(\tau)}{V_{\text{возд}}(\tau) + V_{\text{газа}}(\tau)} \cdot q_{\text{O}_2 \text{ атм. возд}};$$

$$q_{\text{O}_2} 2(\tau) = 0 \text{ \%}.$$

Значение концентрации кислорода непосредственно у датчика кислорода будет запаздывать относительно концентрации возле пламени. Это объясняется небольшой задержкой на процесс горения ($\tau_3 = 0,2 \text{ с}$) и расстоянием от пламени до датчика, на преодоление которого дымовым газам необходимо время ($T_{\text{об}} = 1 \text{ с}$).

В начальный момент времени считаем, что концентрация кислорода возле датчика будет равна концентрации возле пламени:

$$q_{\text{O}_2}(\tau) = q_{\text{O}_2} 1(\tau) = q_{\text{O}_2} 2(\tau) = 0 \text{ \%}.$$

Значения концентрации кислорода с датчика подаются на блок формирования действительного коэффициента расхода воздуха

$$\alpha_{\text{в.д}}(\tau) = \frac{q_{\text{O}_2 \text{ атм. возд}}}{q_{\text{O}_2 \text{ атм. возд}} - q_{\text{O}_2}(\tau)};$$

$$\alpha_{\text{в.д}}(\tau) = \frac{21}{21 - 0} = 1.$$

Действительное значение коэффициента расхода воздуха подается на элемент сравнения. В дальнейшем производим расчеты по ранее описанным выражениям:

$$\varepsilon(\tau) = 1 - 1,05 = -0,05;$$

$$x_1 = 1 \cdot (-0,05) = -0,05;$$

$$x_2 = 1 \cdot 0 = 0.$$

Используя зависимости, приведенные на рис. 2, определяем значения функций принадлежности для каждого нормированного предметного информационного сигнала $A_i^{X_1}$ и $A_i^{X_2}$ при $X_1 = -0,05$; $X_2 = 0$:

$$A_1^{X_1} = 0; A_2^{X_1} = 0,214; A_3^{X_1} = 0,938; A_4^{X_1} = 0,357; A_5^{X_1} = 0;$$

$$A_1^{X_2} = 0; A_2^{X_2} = 0,286; A_3^{X_2} = 1; A_4^{X_2} = 0,286; A_5^{X_2} = 0.$$

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

$$\mu_1^P = \min(A_5^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0;$$

$$\mu_2^P = \min(A_1^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0;$$

$$\mu_3^P = \min(A_4^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,357; 1) = 0,357;$$

$$\mu_4^P = \min(A_2^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,214; 1) = 0,214;$$

$$\mu_5^P = \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,357; 0,286) = 0,286;$$

$$\mu_6^P = \min(A_2^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,214; 0,286) = 0,214;$$

$$\mu_7^P = \min(A_4^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,357; 0,286) = 0,286;$$

$$\mu_8^P = \min(A_2^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,214; 0,286) = 0,214;$$

$$\mu_9^P = \min(A_3^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,938; 0,286) = 0,286;$$

$$\mu_{10}^P = \min(A_3^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,938; 0,286) = 0,286;$$

$$\mu_{11}^P = \min(A_3^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,938; 1) = 0,938.$$

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

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

$$Y = \frac{0 \cdot (1) + 0 \cdot (-1) + 0,357 \cdot (0,5) + 0,214 \cdot (-0,5) + 0,286 \cdot 1 + 0,214 \cdot (-1)}{0 + 0 + 0,357 + 0,214 + 0,286 + 0,214 + 0,286 + 0,214 + 0,286 + 0,286 + 0,938} +$$

$$+ \frac{0,286 \cdot 0 + 0,214 \cdot 0 + 0,286 \cdot 0,5 + 0,286 \cdot (-0,5) + 0,938 \cdot 0}{0 + 0 + 0,357 + 0,214 + 0,286 + 0,214 + 0,286 + 0,214 + 0,286 + 0,286 + 0,938} =$$

$$= \frac{0,1525}{3,081} = 0,049.$$

Поскольку $0,049 > \Delta Y_n(0,01)$, ИМ начинает движение в направлении открытия клапана расхода воздуха на горелку.

Расчетные траектории переходного процесса системы регулирования на основе нечеткой логики представлены на рис. 4.

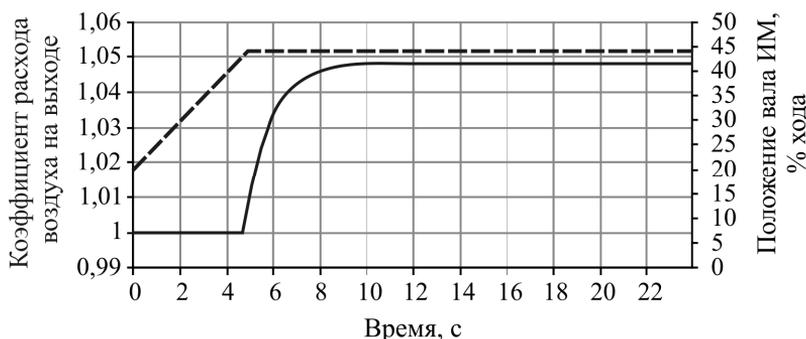


Рис. 4. Переходный процесс системы регулирования:

- коэффициент расхода воздуха на выходе;
- положение вала ИМ

Из графика (см. рис. 4) видно, что время регулирования составляет $\tau_{p1} = \tau_{p2} = 10$ с, а значит, система управления, основанная на нечеткой логике, достаточно быстродействующая, к тому же данная система не допускает перерегулирования.

Для того чтобы оценить экономический эффект системы нечеткого регулирования, рассчитаем расход газа при той же оставшейся теплоте в установившемся режиме ($Q_{оставш}(\tau) = 207,13$ кДж/ τ_d), но при коэффициенте расхода воздуха $\alpha_{в,д}(\tau) = 1,35$, что приблизит расчеты к реальным объектам, которые работают в соответствии с режимами, прописанными в режимных картах.

Программный расчет показал, что для получения остаточной теплоты в процессе горения $Q_{\text{оставш}}(\tau) = 207,13 \text{ кДж}/\tau_{\text{д}}$ необходимо поддерживать расход газа равным $431 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Проверим результат ручным расчетом. Зная расход газа, коэффициент расхода воздуха, коэффициент L_0 , можно рассчитать суммарный расход воздуха на горение

$$F_{\Sigma \text{возд}}(\tau) = \alpha_{\text{в,д}}(\tau) L_0 F_{\text{газа}}(\tau);$$

$$F_{\Sigma \text{возд}}(\tau) = 1,35 \cdot 9,524 \cdot 431 \text{ м}^3/\text{ч} = 5541,54 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Учитывая, что коэффициент расхода воздуха больше единицы, можно сделать вывод, что весь газ принял участие в процессе горения. Тогда теплота, полученная в результате горения,

$$Q_{\text{в рез-те гор}}(\tau) = 35\,341,03 \text{ кДж}/\text{м}^3 \cdot 431 \text{ м}^3/\text{ч} = 15\,231\,983,93 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

Количество воздуха, не принявшего участия в процессе горения,

$$V_{\text{возд, не принявш. уч}}(\tau) = 5541,54 \text{ м}^3/\text{ч} - 431 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 9,524 = 1436,696 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Температура дымовых газов и теплота на обогрев избытка воздуха до этой температуры имеют следующие значения:

$$T_{\text{д,г}} = 194,85 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$Q_{\text{на обогрев возд}}(\tau) = 1436,696 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 1,298\,071 (\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}) \times \\ \times (194,85 \text{ }^\circ\text{C} - 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 307\,492,69 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

Тогда количество оставшейся теплоты

$$Q_{\text{оставш}}(\tau) = 15\,231\,983,93 \text{ кДж}/\text{ч} - 307\,492,69 \text{ кДж}/\text{ч} = 14\,924\,491,24 \text{ кДж}/\text{ч};$$

$$14\,924\,491,24 \text{ кДж}/\text{ч} = 207,28 \text{ кДж}/\tau_{\text{д}} \approx 207,13 \text{ кДж}/\tau_{\text{д}}.$$

Таким образом, экономия системы составит:

- 1) за час работы $431 \text{ м}^3/\text{ч} - 422 \text{ м}^3/\text{ч} = 9 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- 2) за сутки $9 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 24 \text{ ч} = 216 \text{ м}^3/\text{день}$;
- 3) за год $216 \text{ м}^3/\text{день} \cdot 365 \text{ день} = 78\,840 \text{ м}^3/\text{год}$.



Рис. 5. Зависимости расхода газа от оставшейся теплоты:
 — расход газа с применением нечеткого управления;
 - - - расход газа без автоматического регулирования

Из графиков зависимостей расхода газа от оставшейся теплоты в результате процесса горения с нечетким регулированием и без регулирования (рис. 5) видно, что система с нечетким регулированием позволяет экономить газ во всем диапазоне производительности тепловой установки. Кроме того, данная система позволяет экономить значительное количество электроэнергии благодаря тому, что дымосос работает примерно на 70 % от изначальной мощности. Это достигается за счет меньших объемов дымовых газов, которые напрямую зависят от расхода воздуха на процесс горения. Коэффициент расхода воздуха при использовании данной системы уменьшается на ~30 % (с 1,35 до 1,05).

Заключение

Энергосберегающее управление процессом горения в рабочем пространстве тепловых установок при использовании системы управления, основанной на принципе нечеткой логики, имеет ряд преимуществ перед традиционными стабилизирующими системами управления в условиях действия множества случайных факторов и существенно нелинейной связи между входными и выходными величинами, а именно: возможность поддержания определенной траектории выхода на задание, быстрое действие, меньшее значение динамической ошибки и переходный процесс протекает без перерегулирования и колебаний, что благоприятно скажется на ресурсе исполнительного механизма.

Список литературы

1. Управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечеткой логики / М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2014. – № 2 (5). – С. 35–45.
2. Парсункин Б.Н., Васильев М.И. Энергосберегающее нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // АВ ОВО ... (С САМОГО НАЧАЛА ...): материалы конф. / Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2014. – С. 81–90.
3. Батыршин И.З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. – Казань: Отечество, 2001. – 102 с.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
5. 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 Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 4 (36). – С. 69–73.
6. Флер Р., Оттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: учеб. пособие. – М.: Альтекс, 2009. – 197 с.
7. Парсункин Б.Н. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии: учеб. пособие / Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2003. – 267 с.
8. Syropoulos A. Theory of fuzzy computation. – New York: Springer-Verlag, 2014. – 174 p.
9. Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, У.Г. Ахметов; ООО «Полиграфия». – Магнитогорск, 2012. – 406 с.
10. Di Stefano B.N. On the need of a standard language for designing fuzzy systems // On the Power of Fuzzy Markup Language. Studies in Fuzziness and Soft Computing. – 2013. – Vol. 296. – P. 3–15. DOI: 10.1007/978-3-642-35488-5_1
11. Zadeh L.A. Fuzzy algorithms // Information and Control. – 1968. – No. 12 (2). – P. 94–102. DOI: 10.1016/S0019-9958 (68) 90211-8
12. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – No. 8 (3). – P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958 (65) 90241-X
13. 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.

14. Vasilyev M., Vasilyev I. Energy-saving method of fuzzy control combustion process in thermal plants // *Proceed. of the 2018 Int. Rus. Autom. Conf. (RusAutoCon 2018)*, Sochi, Russia, 9–16 September 2018. – IEEE, 2018. – P. 6–12. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501676

15. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И.Д. Рудинского; Горячая линия-Телеком. – М., 2008. – 383 с.

References

1. Vasil'ev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U. Upravlenie davleniem v rabochem prostranstve promyshlennykh pechei pri ispol'zovanii print-sipa nechetkoi logiki [Pressure control in industrial workspace furnaces using the principle of fuzzy logic]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh*, 2014, no. 2, iss. 5, pp. 35–45.

2. Parsunkin B.N., Vasil'ev M.I. Energoberegaiushchee nechetkoe upravlenie davleniem v rabochem prostranstve nagrevatel'nykh pechei [Energy efficient fuzzy control pressure in the working space heating furnaces]. *AB OVO ... (S SAMOGO NACHALA ...). Proceedings of conference*. Magnitogorsk, MGТУ im. G.I. Nosova, 2014, pp. 81–90.

3. Baturshin I.Z. Osnovnye operatsii nechetkoi logiki i ikh obobshcheniia [Basic operations of fuzzy logic and their generalizations]. Kazan, Otechestvo. 2001, 102 p.

4. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podkhod* [Artificial intelligence: a modern approach]. Moscow, Vil'iams, 2006, 1408 p.

5. Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreev S.M., Riabchikov M.Iu. Povyshenie proizvoditel'nosti domennoi pechi, pri optimizatsii avtomaticheskogo upravleniia podachei prirodnoho gaza i tekhnicheskogo kisloroda v dut'e [Blast furnace performance improvement by means of automatic control optimization of natural gas and technical oxygen submission in blasting]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 36, pp. 69–73.

6. Fler R., Ottenburger F. *Vvedenie v elektronnuu tekhniku regulirovaniia* [Introduction to electronic control technology]. Moscow, Al'teks, 2009, 197 p.

7. Parsunkin B.N. Raschety sistem avtomaticheskoi optimizatsii upravleniia tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii [Calculations of automatic optimization systems for process control in metallurgy]. Magnitogorsk, MGТУ im. G.I. Nosova, 2003, 267 p.

8. Syropoulos A. *Theory of Fuzzy Computation*. New York, Springer-Verlag, 2014, 174 p.

9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov U.G. Lokal'nye stabiliziruiushchie kontury avtomaticheskogo upravleniia v ASU TP

promyshlennogo proizvodstva [Local circuits of stabilizing of automatic control in automated process control systems in industrial production]. Magnitogorsk, Poligrafia, 2012, 406 p.

10. Di Stefano B.N. On the Need of a Standard Language for Designing Fuzzy Systems. *On the Power of Fuzzy Markup Language. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2013, vol. 296, pp. 3–15. DOI: 10.1007/978-3-642-35488-5_1.

11. Zadeh L.A. Fuzzy algorithms. *Information and Control*, 1968, no. 12, iss. 2, pp. 94–102. DOI: 10.1016/S0019-9958 (68) 90211-8.

12. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, no. 8, iss. 3, pp. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958 (65) 90241-X.

13. Parsunkin B.N., Vasil'ev M.I., Sibileva N.S. Energoberegaiushchee avtomaticheskoe nechetkoe upravlenie davleniem v rabochem prostranstve nagrevatel'nykh pechei [Energy-saving automatic fuzzy pressure control in the working space of heating furnaces]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2018, no 2, iss. 39, pp. 63–69.

14. Vasilyev M., Vasilyev I. Energy-saving method of fuzzy control combustion process in thermal plants. Proceedings of the 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2018), Sochi, Russia, 9–16 September 2018. IEEE, 2018, P. 6–12. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501676

15. Rutkovskaia D. Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms, and fuzzy systems]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom, 2004, 452 p.

Получено 19.02.2020

Принято 24.04.2020

Сведения об авторах

Васильев Михаил Иванович (Москва, Россия) – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, ведущий эксперт Управления перспективного развития, ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией» (455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: Misha462@yandex.ru, vasilev_mi@interra.ru).

Андреев Сергей Михайлович (Магнитогорск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, завкафедрой «Автоматизированные системы управления», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: pk_su@bk.ru).

Васильев Иван Иванович (Новый Уренгой, Россия) – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, инженер 2-й категории по автоматизации и механизации производственных

процессов филиала Управления автоматизации и метрологического обеспечения, ООО «Газпром добыча Уренгой» (455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: Vasilyev.ivan.ivanovich@yandex.ru).

About the authors

Mikhail I. Vasil'ev (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Senior Expert, Inter RAO – Management of Electric Power Plants LLC (455000, Magnitogorsk, Lenin av., 38, e-mail: Misha462@yandex.ru, vasil'ev_mi@interrao.ru).

Sergei M. Andreev (Magnitogorsk, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Automation Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Lenin av., 38, e-mail: pk_su@bk.ru).

Ivan I. Vasil'ev (Novy Urengoy, Russian Federation) – Ph.D. Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Engineer of the 2nd Category for Automation and Mechanization of Production Processes, Gazprom добыча Urengoy LLC (455000, Magnitogorsk, Lenin av., 38, e-mail: Vasilyev.ivan.ivanovich@yandex.ru).

Библиографическое описание статьи согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018:

Васильев, М.И. Регулятор подачи воздуха в рабочее пространство тепловой установки, основанный на нечеткой логике / М. И. Васильев, С. М. Андреев, И. И. Васильев. – DOI 10.15593/2499-9873/2020.2.06. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2020. – № 2. – С. 99–121.

Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:

Васильев М.И., Андреев С.М., Васильев И.И. Регулятор подачи воздуха в рабочее пространство тепловой установки, основанный на нечеткой логике // Прикладная математика и вопросы управления. – 2020. – № 2. – С. 99–121. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.2.06

Цитирование статьи в references и международных изданиях:

Cite this article as:

Vasil'ev M.I., Andreev S.M., Vasil'ev I.I. Air supply regulator for the working space heat installation based on fuzzy logic. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2020, no. 2, pp. 99–121. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.2.06 (in Russian)