

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

MODELLING

УДК: 66.041.2-52

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.

Аннотация. Рассмотрена структурная схема, математическая модель и алгоритм расчёта системы автоматического управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей, основанная на принципе нечёткой логики. Составлены функции принадлежности нечётких множеств для входных лингвистических переменных. Сформулированы базы правил с учётом обратнопропорциональной статической характеристики объекта управления. Определена динамика изменения регулируемого параметра за счёт решения двух дифференциальных уравнений методом Эйлера. Осуществлён поиск уровней «отсечений» для предпосылок каждого из правил с использованием операции «минимум» в соответствии с составленной базой правил. Произведена процедура дефазификации (приведение к чёткости). Показаны преимущества данной системы над 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.

Ключевые слова. Лингвистическая переменная, степень истинности, функции принадлежности, нечёткие множества, эвристические правила.

PRESSURE CONTROL IN INDUSTRIAL WORKSPACE FURNACES USING THE PRINCIPLE OF FUZZY LOGIC

Vasiliev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U.

Abstract. The structural scheme, the mathematical model and algorithm for calculating the automatic control system pressure in the working space of industrial furnaces, based on the principle of fuzzy logic. Composed of the membership function of fuzzy sets for the input linguistic variables. Formulated the rule base given inversely static characteristics of the control object. The dynamics of the controlled parameter changes by addressing the two differential equations by Euler's method. We search levels "truncation" prerequisites for each of the rules using the operation "minimum" prepared in accordance with the rule base. Defuzzification procedure performed (leading to definition). The advantages of this system over conventional stabilizing control systems under the action of a set of random factors and the highly nonlinear relationship between input and output values. The optimal values of the scaling factors for the developed system of automatic control.

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

Актуальность работы

Газодинамический режим или давление в рабочем пространстве промышленных печей определяет величину удельного расхода топлива, влияет на потери металла с окалиной и сохранность печей, а особенно на загазованность атмосферы производственного помещения.

Несмотря на многообразие различных факторов, определяющих величину давления, имеется всего лишь один управляющий параметр. Это изменение разряжения в дымоотводящем канале печи, путём изменения положения поворотного клапана.

Автоматическое управление газодинамическим режимом обычно осуществляется путём стабилизации давления под сводом рабочего пространства в зоне выдачи из печи нагретого изделия или металла.

В работе [1] предложено для условий многозонных печей, работающих в условиях переменной производительности управление давлением осуществлять по импульсу давления, отбираемого на уровне нагреваемого изделия в зоне, куда подаётся максимальное количество топлива. Это обеспечивает условия по обслуживанию мете отбора импульса и получения экономического эффекта путём снижения удельного расхода топлива за счет повышения оперативности управления.

В условиях действия множества случайных факторов, существенно нелинейной связи между входными и выходными величинами, традиционные стабилизирующие автоматические системы управления недостаточно эффективно справляются с задачами управления.

Основной причиной этого является предположение о линейности свойств объекта управления, что часто не соответствует реальному положению.

Основные проблемы и решения

В таких сложных реальных условиях для автоматического управления технологическими процессами целесообразно использовать стабилизирующие автоматические системы, принцип действия которых основан на использовании теории нечётких множеств и нечёткой логики [2], [3]. Вместо двоичных логических схем, характерных для большинства существующих управляющих систем, отображающих только ложные и истинные события (0,1), принцип нечёткой логики позволяет программно-реализованным стабилизирующим системам автоматического управления функционировать в диапазоне степени истинности от 0,0 до 1,0 включительно.

Синтез нечётких систем, основанных на формализации и имитации действий эксперта-технолога по управлению технологическим процессом, реализуется путём создания рабочих программ для УВМ. Это обладает существенным преимуществом перед автоматическими системами, основанными на традиционных способах управления. Поскольку обусловлено заменой упрощённой динамической количественной модели управляемого технологического процесса качественной многосторонней лингвистической моделью, составленной из логических правил, задаваемых в форме «Если..., то...».

Следует отметить, что используя методы синтеза нечётких алгоритмов управления, можно осуществлять оптимизацию сложных контуров управления без проведения всесторонних математических исследований – используя сформулированную базу правил управления.

В теории нечётких множеств определяющую и центральную роль имеют понятия: «лингвистическая переменная» – это функция, определяющая степень принадлежности элемента (лингвистической переменной) x к нечёткому множеству (терму) – X в форме численного значения в диапазоне [0,1]. Это численное значение называется «степенью истинности» лингвистической переменной [4].

Структурная схема системы автоматического управления и её математическая модель

Структурная схема системы автоматического управления давлением в рабочем пространстве промышленной печи, синтезированная на основе теории нечёткой логики, представлена на рис. 1.

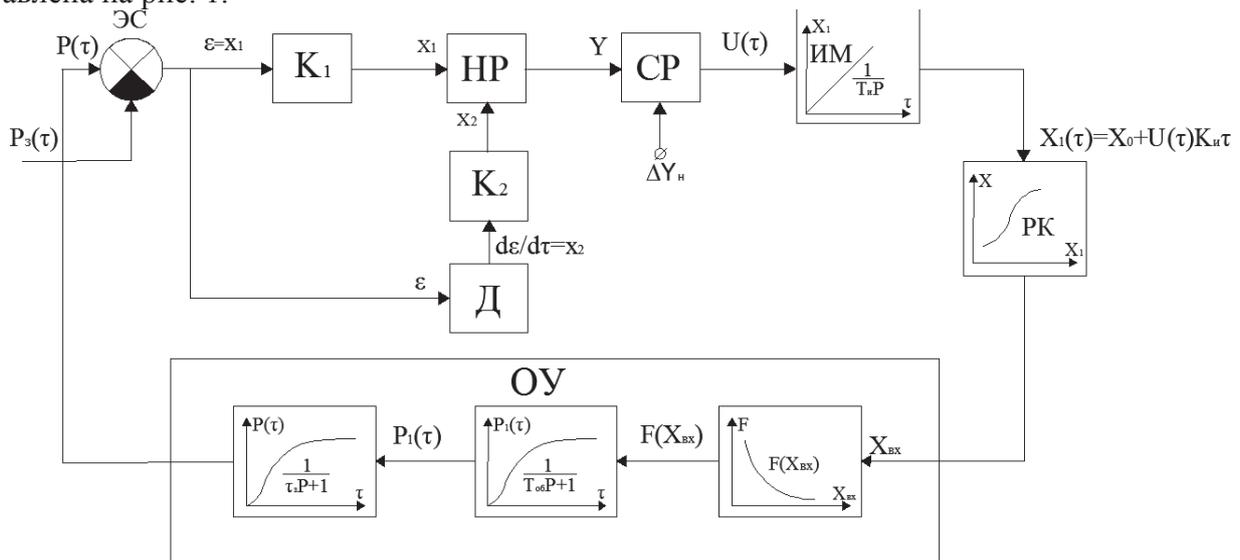


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования давления с использованием принципа нечёткого управления

На рис. 1 введены обозначения: ЭС – элемент сравнения сигнала задания давления $P_3(t)$ и текущего давления в рабочем пространстве печи $P(t)$; X_1 – нормированный сигнал текущего рассогласования; X_2 – нормированный текущий сигнал скорости изменения сигнала

ла рассогласования; K_1 и K_2 – блоки масштабирования; Д – дифференцирующий блок; НР – программно-реализованный нечёткий регулятор; СР – логический элемент сигнум-реле, где сравнивается нормированный управляющий сигнал $Y(\tau)$ с заданной величиной зоны нечувствительности контура управления ΔY_H ; ИМ – исполнительный механизм; РК – регулирующий (дымовой) клапан; ОУ – объект управления, представленный нелинейным статическим звеном с характеристикой $\bar{P}(\tau) = F[X_{вх}(\tau)]$ и двумя инерционными звеньями первого порядка с постоянными времени $T_{об}$ и τ_3 .

На вход контура, синтезированного на принципе нечёткого управления подаётся текущий сигнал задания $P_3(\tau)$, формируемый технологом оператором, и сигнал $P(\tau)$, формируемый датчиком текущего давления в рабочем пространстве печи.

На элементе сравнения ЭС эти сигналы сравниваются и формируется сигнал рассогласования $\varepsilon(\tau)$ в соответствии с выражением (1):

$$\varepsilon(\tau) = P_3(\tau) - P(\tau). \quad (1)$$

Сигнал рассогласования $\varepsilon(\tau)$ одновременно подаётся на блок масштабирования K_1 и далее на вход программно-реализованного нечёткого регулятора НР и на вход дифференцирующего блока Д и после масштабирования выходного сигнала $d\varepsilon(\tau)/d\tau$ в блоке масштабирования K_2 на вход НР.

Блоки масштабирования с коэффициентами K_1 и K_2 необходимы для нормирования на предметной области существования входных сигналов нечёткого регулятора. Эти коэффициенты влияют на качество управления, являясь параметрами настройки контура управления.

На вход нечёткого регулятора поступают два нормированных сигнала, определяемые в соответствии с выражениями (2):

$$X_1 = \frac{\varepsilon(\tau)}{K_1} \text{ и } X_2 = \frac{1}{K_2} \cdot \left[\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right], \quad (2)$$

где X_1 – нормированный сигнал текущего рассогласования; X_2 – нормированный текущий сигнал скорости изменения сигнала рассогласования.

На входе нечёткого регулятора формируется нормированный управляющий сигнал $Y(\tau)$, который подаётся на вход логического элемента сигнум-реле (СР), где сравнивается с заданной величиной зоны нечувствительности контура управления ΔY_H .

На выходе СР формируется управляющая функция $U(\tau) \in (-1, 0, +1)$, определяемая в соответствии с условием (3):

$$U(\tau) = \begin{cases} -1, & \text{если } Y(\tau) \geq \frac{\Delta Y_H}{2}, \\ 0, & \text{если } -\frac{\Delta Y_H}{2} < Y(\tau) < \frac{\Delta Y_H}{2}, \\ +1, & \text{если } Y(\tau) \leq -\frac{\Delta Y_H}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Управляющая функция $U(\tau)$ определяет текущее направление движения исполнительного механизма ИМ, перемещающего дымовой клапан в соответствии с выражением (4):

$$X_{вх}(\tau) = X_H + U(\tau) \cdot \bar{K}_{им} \cdot \tau, \quad (4)$$

где $X_{вх}(\tau)$, X_H – соответственно текущее и начальное положения дымового клапана, %; $\bar{K}_{им}$ – средняя скорость перемещения исполнительного механизма, %/с; τ – текущее время.

Динамические свойства объекта управления аппроксимированы последовательным соединением трёх звеньев: нелинейного статического звена с характеристикой $\bar{P}(\tau) = F[X_{вх}(\tau)]$ и двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени $T_{об}$ и τ_3 . Первое инерционное звено с постоянной времени $T_{об}$ характеризует инерционность давления, а второе звено – величину запаздывания управляемого процесса.

Математическое обеспечение нечёткого регулятора

В рассматриваемой системе автоматического управления давлением в рабочем пространстве промышленной печи нечёткий регулятор НР формирует управляющее воздействие в соответствии с принципом нечёткой логики следующим образом.

Вводятся лингвистические переменные: X_1 – «рассогласование»; X_2 – «скорость рассогласования»; Y – «нормированный управляющий сигнал».

В области определения текущего нормированного сигнала рассогласования X_1 вводятся пять нечётких множеств, определяющих их значения 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» [5, 6]. Аналогично определяем функции принадлежности $A_i^{X_2}$ для значений лингвистической переменной X_2 .

Нечёткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности B_i : B_1 – «положительное большое»; B_2 – «положительное малое»; B_3 – «нулевое»; B_4 – «отрицательное малое»; B_5 – «отрицательное большое».

Нечёткие множества выходной лингвистической переменной Y представим в виде вектора $B_i = [1; 0,5; 0; -0,5; -1]$.

Графически функция принадлежности нечётких множеств $\mu(x)$ и значения их параметров в зависимости от величин нормированных входных переменных X_1 и X_2 представлены на рис. 2.

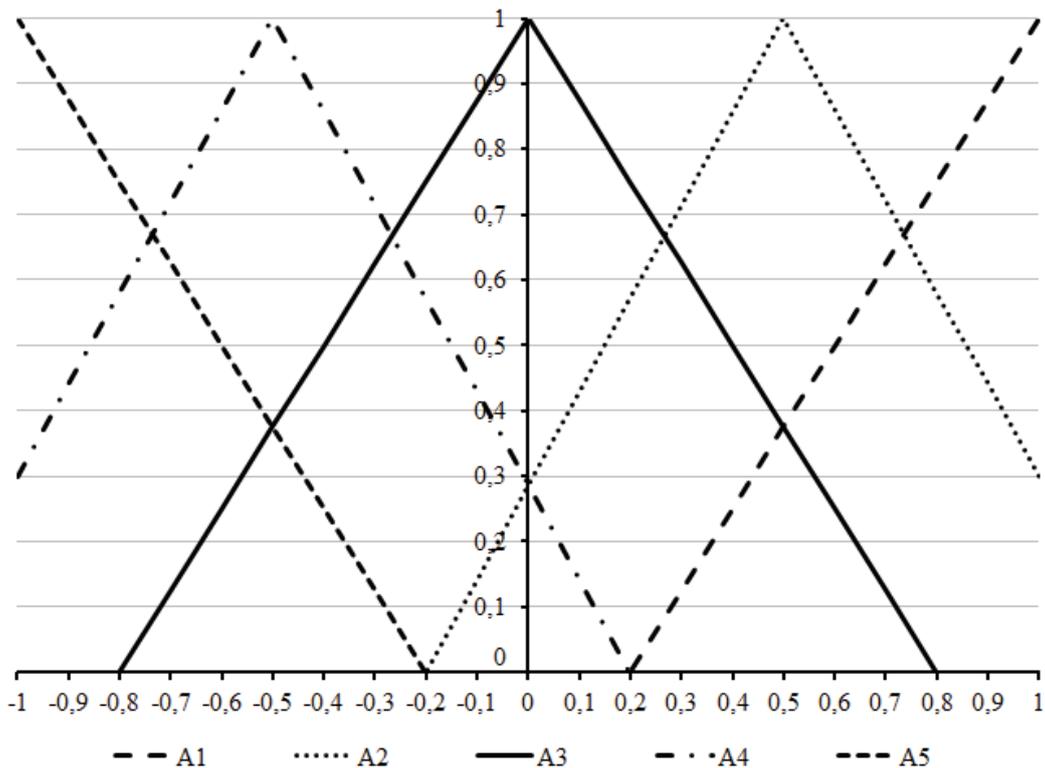


Рис. 2. Функция принадлежности нечётких множеств для входных переменных X_1 и X_2

В рассматриваемой системе выберем для лингвистических переменных X_1 и X_2 следующие функции принадлежности:

- $A_5^{X_1}, A_5^{X_2}$ – Z-функция, при $i=1,2$:

$$A_5^{X_i} = \begin{cases} -1, & \text{если } X_1 < -1, \\ -1,25 \cdot X_1 - 0,25, & \text{если } -1 \leq X_1 \leq -0,2, \\ 0, & \text{если } X_1 > -0,2; \end{cases} \quad (5)$$

- $A_4^{X_i}, A_3^{X_i}, A_2^{X_i}$ – Л-функция, при $i=1,2$:

$$A_4^{X_1} = \begin{cases} \frac{7}{5}X_1 + \frac{17}{10}, & \text{если } -1 \leq X_1 \leq -0,5, \\ \frac{-10}{7}X_1 + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,5 < X_1 \leq 0,2, \\ 0, & \text{если } X_1 > 0,2; \end{cases} \quad (6)$$

$$A_3^{X_1} = \begin{cases} -1,25 \cdot X_1 + 1, & \text{если } 0 < X_1 \leq 0,8, \\ 1,25 \cdot X_1 + 1, & \text{если } -0,8 \leq X_1 \leq 0, \\ 0, & \text{если } X_1 > 0,8 \text{ или } X_1 < -0,8; \end{cases} \quad (7)$$

$$A_2^{X_1} = \begin{cases} \frac{10}{7}X_1 + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,2 \leq X_1 \leq 0,5, \\ \frac{-7}{5}X_1 + \frac{17}{10}, & \text{если } 0,5 < X_1 \leq 1, \\ 0, & \text{если } X_1 < -0,2; \end{cases} \quad (8)$$

– A_1 – S-функция, при $i=1,2$:

$$A_1^{X_1} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_1 > 1, \\ 1,25 \cdot X_1 - 0,25, & \text{если } 0,2 \leq X_1 \leq 1, \\ 0, & \text{если } X_1 < 0,2. \end{cases} \quad (9)$$

Для лингвистической переменной X_2 функции принадлежности записываются также, как и для переменной X_1 . Функции принадлежности нечётких множеств $\mu(x)$ [7-9] для входных переменных X_1 и X_2 показаны на рис. 2.

При реализации нечёткого управления и формирования правил нечёткого управления принято основное эвристическое правило, которое определяет стратегию нечёткого регулирования давлением в рабочем пространстве печи. Это правило формулируется следующим образом: «если наблюдается наличие рассогласования $\varepsilon(\tau)$ между текущим $P(\tau)$ и заданным $P_3(\tau)$ значениями стабилизируемого управляемого параметра, тогда необходимо сформировать управляющее воздействие, обеспечивающее компенсацию возникшего сигнала рассогласования, при $\varepsilon(\tau) = 0$ в течение заданного времени процесс управления считается завершённым».

При составлении базы правил следует учесть следующие обстоятельства:

- в каждом конкретном случае логику управления технологическим процессом следует согласовать с реальными условиями и условием формирования сигнала рассогласования;
- учитывая обратнопропорциональный вид статической характеристики $\bar{P}(\tau) = F[X_{\text{вх}}(\tau)]$, для увеличения $P(\tau)$ следует закрывать дымовой клапан, уменьшая разряжение в дымовом клапане, то есть принимать $U(\tau) = -1$;
- направление движения ИМ и значение вектора B_i должно всегда технологически соответствовать требуемому изменению сигнала рассогласования, приближая его значение к нулю.

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

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

$$R_{11}: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) \rightarrow Y = B_3.$$

Каждое правило логически характеризует реальную ситуацию и рекомендует соответствующее управляющее воздействие [8, 10].

Так, например, эвристическое правило R_1 можно сформулировать следующим образом «Если скорость изменения рассогласования близка к нулю ($A_3^{X_2} = \text{«Нулевое»}$) и возникло большое отрицательное рассогласование вследствие изменения задания на снижение давления ($A_5^{X_1} = \text{«Отрицательное большое»}$), то на выходе нечёткого регулятора должен появиться управляющий сигнал пропорциональный максимальному перемещению ИМ в направлении «Отрицательное большое», т.е. в направлении открытия клапана»

Или эвристическое правило R_3 формулируется так «Если регулируемая величина $P(\tau)$ немного больше заданного значения ($A_4^{X_1} = \text{«Отрицательное малое»}$), а скорость изменения сигнала рассогласования близка к нулю ($A_3^{X_2} = \text{«Нулевое»}$), то на выходе нечёткого регулятора формируется сигнал пропорциональный небольшому перемещению ИМ для уменьшения давления с целью устранения сигнала рассогласования $B_4 = \text{«Отрицательное малое»}$, т.е. в направлении открытия дымового клапана.

Аналогично технологически формулируются все остальные правила.

Далее с использованием конкретных предметных нормированных значений X_1 и X_2 , полученных из решения методом Эйлера двух дифференциальных уравнений, определяющих динамику изменения регулируемого параметра при теоретическом исследовании или по данным с реального объекта, с использованием функций принадлежности определяются их конкретные значения для всех лингвистических переменных $A_i^{X_1}$ и $A_i^{X_2}$.

Затем осуществляется поиск уравнений «Отсечений» для предпосылок каждого из правил с использованием операции «Минимум» в соответствии с базой правил следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_1^P &= A_5^{X_1} \cap A_3^{X_2} \rightarrow \mu_1^P = \min(A_5^{X_1}; A_3^{X_2}); \\ \mu_2^P &= A_1^{X_1} \cap A_3^{X_2} \rightarrow \mu_2^P = \min(A_1^{X_1}; A_3^{X_2}); \\ \dots\dots\dots \\ \mu_{10}^P &= A_3^{X_1} \cap A_2^{X_2} \rightarrow \mu_{10}^P = \min(A_3^{X_1}; A_2^{X_2}); \\ \mu_{11}^P &= A_3^{X_1} \cap A_3^{X_2} \rightarrow \mu_{11}^P = \min(A_3^{X_1}; A_3^{X_2}). \end{aligned}$$

С целью преобразования результата нечёткого вывода в чёткое физическое значение управляющего воздействия проводится процедура дефаззификации «Приведение к чёткости» [11]. Для этого чёткое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) определяется по формуле (10):

$$Y(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^R}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P} = \frac{\sum_{i=1}^{11} (\mu_i^R \cdot \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P}. \quad (10)$$

Реализация нечёткого управления давлением в рабочем пространстве

Реализацию нечёткого управления давлением в рабочем пространстве рассмотрим на конкретном примере. Экспериментальная статическая характеристика процесса в координатах «давление, Па – положение ИМ дымового клапана, %хода ИМ, при максимальных расходах газа и воздуха представлена уравнением (11):

$$\bar{P}(\tau) = 63,03 - 1,153 \cdot X_{\text{вх}} + 6,386 \cdot 10^{-3} \cdot X_{\text{вх}}^2 \quad (11)$$

при $10 \% \leq X \leq 95 \%$.

Процесс характеризуется следующими экспериментально полученными динамическими параметрами: коэффициент передачи объекта – $K_{об} = 0,62 \left(\frac{\text{Па}}{\% \text{хода}} \right)$; постоянная времени – $T_{об} = 6$ с; время запаздывания – $\tau_3 = 0,5$ с. Начальное установившееся давление до момента $\tau = 0$ составляло $P(\tau = 0) = 21,1$ (Па), положение дымового клапана 50 процентов хода, скорость исполнительного механизма принята постоянной $K_{ИМ} = 8 \left(\frac{\% \text{хода}}{\text{с}} \right)$, зона нечувстви-

тельности $\Delta Y_H = 0,01$. В момент времени $\tau = 0$ поступил сигнал на изменение задания до $P_3(\tau) = 42$ (Па).

При синтезе нечёткого регулятора с учётом реальных условий величины нормирующих масштабных коэффициентов приняты равными $K_1 = -80$; $K_2 = -50$ период дискретизации расчёта $\Delta\tau = 0,05$ с.

В момент $\tau \leq 0$ процесс характеризовался с предыдущими параметрами:

$$\begin{aligned} \bar{P}(F(X_{\text{вх}})) &= P_1(\tau) = 21,34 \text{ (Па)}, \\ \frac{dP_1(\tau)}{d\tau} &= \frac{dP(\tau)}{d\tau} = 0 \text{ - установленный режим,} \\ \varepsilon(\tau) &= P(\tau) - P_3(\tau) = 21,34 - 42 = -20,66 \text{ (Па)}, \\ X_1 &= \frac{\varepsilon(\tau)}{K_1} = \frac{-20,66}{-80} = 0,258; \quad X_2 = \frac{1}{K_2} \cdot \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} = \frac{0}{-50} = 0. \end{aligned}$$

Для вещественных переменных X_1 и X_2 определяются соответствующие функции принадлежности, используя выражения (5)-(9) или данные представленные на рис. 2.

$$\begin{aligned} A_1^{X_1} &= 0,073; A_2^{X_1} = 0,655; A_3^{X_1} = 0,677; A_4^{X_1} = A_5^{X_1} = 0, \\ A_1^{X_2} &= 0; A_2^{X_2} = 0,286; A_3^{X_2} = 1; A_4^{X_2} = 0,286; A_5^{X_2} = 0. \end{aligned}$$

В соответствии с базой правил производим с использованием операции минимум поиск уровня «отсечений» для предпосылок каждого из правил:

$$\begin{aligned} \mu_1^P &= \min(A_5^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_2^P &= \min(A_1^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,073; 1) = 0,073; \\ \mu_3^P &= \min(A_4^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_4^P &= \min(A_2^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,655; 1) = 0,655; \\ \mu_5^P &= \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0; 0,3) = 0; \\ \mu_6^P &= \min(A_2^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,655; 0,286) = 0,286; \\ \mu_7^P &= \min(A_4^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0; 0,286) = 0; \\ \mu_8^P &= \min(A_2^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,655; 0,286) = 0,286; \\ \mu_9^P &= \min(A_3^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,677; 0,286) = 0,286; \\ \mu_{10}^P &= \min(A_3^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,677; 0,286) = 0,286; \\ \mu_{11}^P &= \min(A_3^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,677; 1) = 0,677. \\ Y &= \frac{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^R}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P} = \frac{\sum_{i=1}^{11} (\mu_i^P \cdot \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P}; \\ Y &= \frac{0 \cdot (-1) + 0,073 \cdot 1 + 0 \cdot (-0,5) + 0,655 \cdot 0,5 + 0 \cdot (-1) + 0,286 \cdot 1}{0 + 0,073 + 0 + 0,655 + 0 + 0,286 + 0 + 0,286 + 0,286 + 0,286 + 0,677} + \\ &+ \frac{0 \cdot 0 + 0,286 \cdot 0 + 0,286 \cdot (-0,5) + (0,286 \cdot 0,5) + 0,677 \cdot 0}{0 + 0,073 + 0 + 0,655 + 0 + 0,286 + 0 + 0,286 + 0,286 + 0,286 + 0,677} = \\ &= \frac{0,6865}{2,549} = 0,269. \end{aligned}$$

Поскольку $0,269 > \Delta Y_H$, то ИМ начинает движение в направлении закрытия клапана для увеличения $P(\tau)$ при $U = -1$;

При $\tau_1 = 0,05$ с:

$$\begin{aligned} X_{\text{вх}}(\tau_1) &= X_H + U(\tau) \cdot \bar{K}_{\text{нм}} \cdot \Delta\tau = 50 - 1 \cdot 8 \cdot 0,05 = 49,6 \text{ (% хода)}, \\ F_1(X_{\text{вх}}) &= 63,03 - 1,153 \cdot 49,6 + 6,386 \cdot 10^{-3} \cdot 49,6^2 = 21,55 \text{ (Па)}. \end{aligned}$$

В момент $\tau \geq 0$ произошло возмущение по заданию, т.е. параметр $P(\tau)$ получил возможность к изменению на величину ΔP_1 :

$$\Delta P_1(0) = \frac{\Delta\tau}{T_0} \cdot [F(X_{\text{вх}}(\tau = 0,05)) - P_1(\tau = 0)] = 0,001724 \text{ (Па)}.$$

Значит за время $0,05$ с величина $P_1(\tau)$ увеличилась на $0,001724$ (Па) и стала равной:

$$P_1(\tau = 0,05) = P_1(0) + \Delta P_1(0) = 21,34205 \text{ (Па)}.$$

Изменение $P(\tau)$ за время первого шага $\Delta\tau$ будет:

$$\Delta P(1) = \frac{\Delta\tau}{T_0} \cdot [P_1(\tau = 0,05) - P(\tau = 0)] = \frac{0,5}{6} \cdot [21,34205 - 21,34] = 0,000172 \text{ (Па)}.$$

Значение $P(\tau_1)$ будет:

$$P(\tau_1) = P(0) + \Delta P(0) = 21,34 + 0,000172 = 21,340172 \text{ (Па)}.$$

Поскольку за время 0,05 с значение $P(\tau)$ практически не изменялось, то величина расогласования за время $\Delta\tau$ изменится незначительно $21,340172 - 42 = -20,6598$ (Па). Поэтому это не окажет заметного влияния на величину $Y(\tau)$ и на следующий интервал времени $\Delta\tau$ движение ИМ в направлении закрытия шибера сохранится и далее расчёт повторяется в рассмотренной последовательности. Расчётная траектория переходного процесса системы регулирования на основе нечёткой логики представлена на рис. 3.

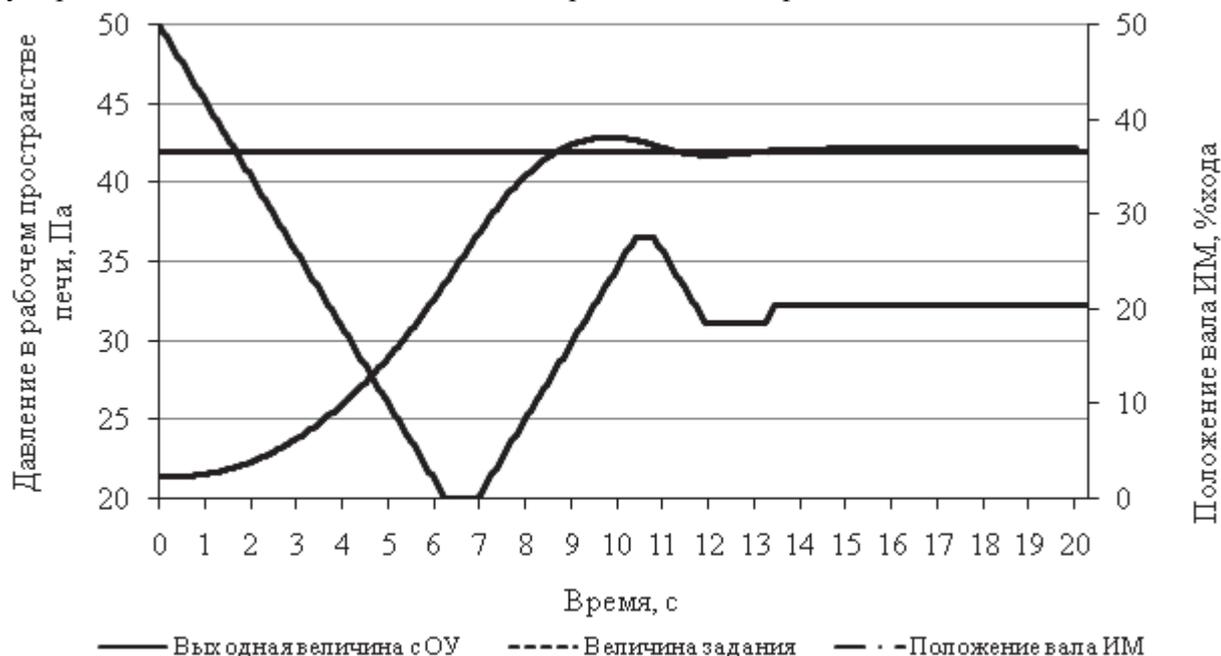


Рис. 3. Переходный процесс системы регулирования при $K_1 = -80, K_2 = -50$

Из графика (рис. 3) видно, что первое время регулирования составляет $\tau_{p1} = 8,6$ с и полное время регулирования $\tau_{p2} = 10,8$ с (величина динамической ошибки составляет 1 %).

Достоинством регуляторов основанных на нечёткой логике является не только их быстроедействие, но и возможность поддержания определённой траектории выхода на задание.

При дальнейшей настройке регулятора был получен следующий переходный процесс с значениями коэффициентов масштабирования $K_1 = -55, K_2 = -33$ (рис. 4). При этом время регулирования составило $\tau_{p2} = \tau_{p1} = 8,6$ с.

Для того чтобы убедиться в целесообразности использования регулятора основанного на принципе нечёткой логики, сравним его с ПИД-регулятором. Переходный процесс системы с ПИД-регулятором, настроенным по методу 20 % перерегулирования представлен на рис. 5.

Из рисунка 5 видно, что время первого регулирования составляет $\tau_{p1} = 8,2$ с, полного регулирования – $\tau_{p2} = 65$ с, а величина динамической ошибки – 7 %, что для современных систем автоматического управления недопустимо. Поэтому воспользуемся настройкой по методу минимальной динамической ошибки (рис. 6).

При использовании метода настройки ПИД-регулятора для минимальной динамической ошибки (рис. 6) получаем следующие показатели качества регулирования: время первого регулирования составляет $\tau_{p1} = 8,2$ с, полного регулирования – $\tau_{p2} = 53$ с, а величина динамической ошибки – 3 %.

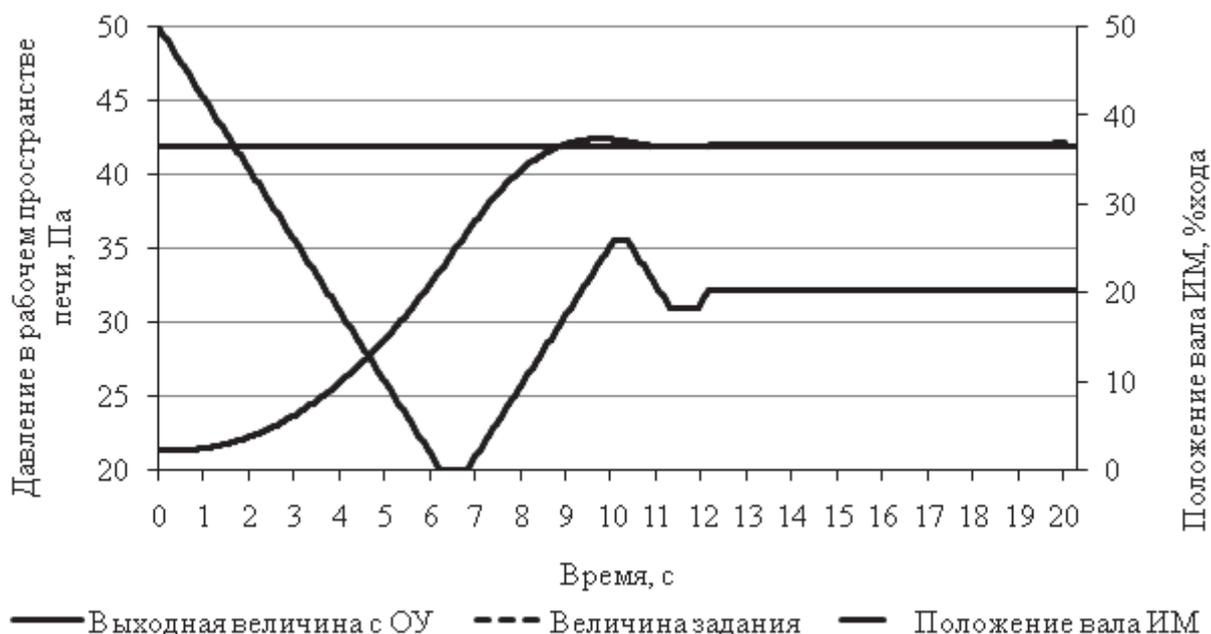


Рис. 4. Переходный процесс системы регулирования при $K_1 = -55, K_2 = -33$

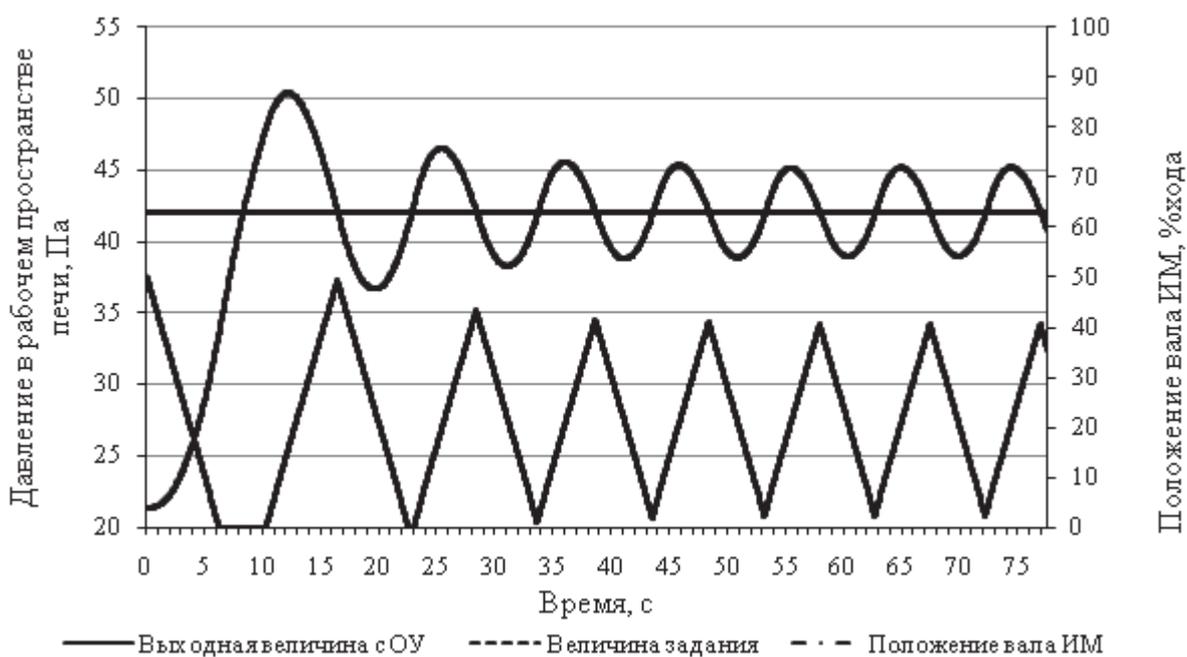


Рис. 5. Переходный процесс системы регулирования с ПИД-регулятором при $K_p = 23,23, T_i = 1$ и $T_n = 0,1$

Исходя из вышеизложенных фактов можно сделать вывод, что регулятор, основанный на принципе нечёткой логики, более быстро-действенный, нежели ПИД-регулятор и имеет меньшую величину динамической ошибки (1% против 3%).

Заключение

Управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании системы управления, основанной на принципе нечёткой логики, имеет ряд преимуществ над традиционными стабилизирующими системами управления, в условиях действия множества случайных факторов и существенно нелинейной связи между входными и выходными величинам, а именно: возможность поддержания определённой траектории выхода на задание, быстродействие, меньшее значение динамической ошибки (1% против ~ 3%) и переход-

ный процесс протекает без перерегулирования и колебаний, что благоприятно скажется на ресурсе исполнительного механизма.

Следует отметить, что используя методы синтеза нечётких алгоритмов управления, можно осуществлять оптимизацию сложных контуров управления без проведения всесторонних математических исследований – используя сформулированную базу правил управления.

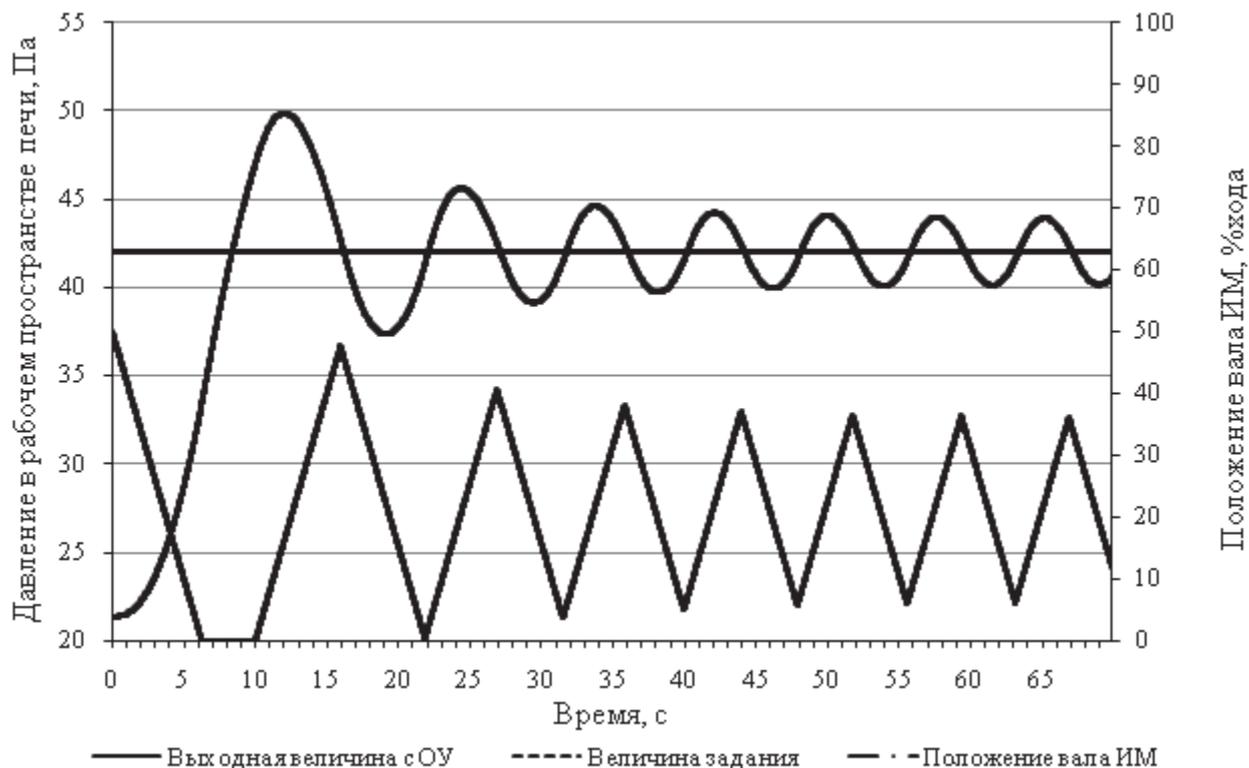


Рис. 6. Переходный процесс системы регулирования с ПИД-регулятором при $K_p = 27,1$, $T_i = 0,65$ и $T_n = 0,25$

Список используемых источников

1. Парсункин, Б.Н. Определение места отбора импульса для управления давлением в рабочем пространстве методических печей / Б.Н. Парсункин, В.В. Дегтяров // М: Известия вузов «Чёрная металлургия» – 1992. – №11. – С. 63-65.
2. Прикладные нечёткие системы / Под редакцией Т. Тэрано, К. Асан, К. Сучено – М: МИР, 1993 – 368 с.
3. Батыршин, И.З. Основные операции нечёткой логики и их обобщения / И.З. Батыршин // Казань: «Отечество», 2001 – 102 с.
4. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. – 166 с.
5. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский // М: «Горячая линия – Телеком», 2004 – 452 с.
6. Dadios, E.P. Fuzzy Logic - Algorithms. Techniques and Implementations / издательство ИнТех, 2012 – 294 с.
7. Рябчиков, М.Ю. Достижение максимальной производительности оптимизируемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова, Н.А. Головки, О.С. Логунова, П.Г. Полько // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 2. – С. 5-9.
8. Рябчиков, М.Ю. Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, Н.А. Головки, П.Г. Полько // Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – №4 (36). – С. 69-73.
9. Андреев, С.М. Разработка концепции экстремальной нечеткой системы автоматической оптимизации управления энергетическим режимом выплавки стали в ДСП / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, Н.А. Головки, О.С. Логунова, М.В. Усачев, П.Г. Полько // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 3. – С. 88-91
10. Syropoulos, A. Theory of Fuzzy Computation. Springer, 2014. – 170 с.
11. Uziel Sandler, Lev Tsitlovsky Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic. Springer, 2008. – 478 с.

Васильев Михаил Иванович – студент кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: Misha462@yandex.ru.

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, действительный член АИИ им. А.М. Прохорова, проф. кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: оптимизация управления технологическими процессами металлургического производства. Тел. 8(3519)298432. E-mail: pksu035@gmail.com.

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Направление исследований: оптимизация управления технологическими процессами металлургического производства. Тел. 8(3519)298527. E-mail: pk_su@bk.ru.

Ахметов Тимур Уралович – аспирант кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Васильев М.И., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У. Моделирование управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечёткой логики // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2014. – №2. – С. 35-45.

Vasiliev, M.I., Parsunkin, B.N., Andreev, S.M. and Akhmetov, T.U., 2014. Pressure control in industrial workspace furnaces using the principle of fuzzy logic. Software of systems in the industrial and social fields, 2: 35-45.

УДК 681.3.06

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Макарычев П.П., Захарикова Е.Б.

Аннотация. Обсуждаются модели и алгоритмы имитационного моделирования систем и сетей массового обслуживания. Обосновывается разработка программного комплекса с применением языка программирования C++ для математического пакета Mathcad. Приводятся примеры использования программного комплекса.

Ключевые слова. Имитационное моделирование, анализ систем массового обслуживания, стохастическая сеть Петри, технология разработки программного комплекса.

MATHEMATICAL AND ALGORITHMIC SUPPORT OF SOFTWARE FOR SIMULATION DYNAMIC SYSTEMS

Makarychev P.P., Zakharikova E.B.

Abstract. Models and algorithms for simulation of queuing systems and queuing networks are discussed. The development of software using the C++ programming language for mathematical package Mathcad is justified. Examples of using the software are given.

Keywords. Simulation, analysis of queuing systems, stochastic Petri network, software development technology.

Представление модельного времени

Динамическая природа дискретно-событийных имитационных моделей требует отслеживания текущего значения имитационного времени по мере функционирования имитационной модели. Существует два основных подхода к продвижению модельного времени: продвижение времени с постоянным шагом и продвижение времени от события к событию [1]. При использовании продвижения времени от события к событию часы модельного времени в исходном состоянии устанавливаются в «ноль» и определяется время возникновения будущих событий. После этого часы модельного времени переходят на время возникновения ближайшего события, и в этот момент обновляются состояние системы с учетом произошедшего события, а также сведения о времени возникновения будущих событий. Затем часы модельного времени продвигаются ко времени возникновения следующего (нового) ближайшего события, обновляется состояние системы и определяется время будущих событий, и т. д. Процесс продвижения модельного времени от времени возникновения одного события ко времени возникновения другого продолжается до тех пор, пока не будет выполнено какое-либо условие останова, указанное заранее [2].

Модели и алгоритмы источников заявок

Центральное место в перечне вопросов, связанных с имитацией стохастических элементов системы, занимает проблема построения датчиков случайных величин с заданными законами распределения. Базовым алгоритмом, на основе которого могут быть разработаны