

# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

# УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

# CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 62-55:681.515

Гостев В. И.

Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Государственного университета информационно-коммуникационных технологий, г. Киев

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИДЕНТИЧНЫХ КОЛОКОЛООБРАЗНЫХ ФУНКЦИЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Получены аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных колоколообразных функциях принадлежности, изложены вопросы проектирования нечеткого регулятора и предложена практическая схема нечеткого регулятора.

**Ключевые слова:** автоматическое управление, нечеткий регулятор, проектирование, нечеткая логика, функции принадлежности, MATLAB.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование нечетких регуляторов осуществляется на основе пакета нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox с использованием мощного средства моделирования и исследования систем управления с обратной связью Simulink интерактивной системы MATLAB. Метод проектирования на основе пакета нечеткой логики системы MATLAB достаточно подробно изложен, например, в работах [1, 2]. В работе [3] предложен новый метод проектирования одного класса нечетких регуляторов, основанный на полученных аналитических выражениях для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при симметричных треугольных, возведенных в степень треугольных, экспоненциальных, колоколообразных и гауссовых функциях принадлежности с двумя термами. Представлена функциональная схема нечеткого регулятора, на базе которой возможна реализация нечетких регуляторов программным или аппаратным способом. При проектировании нечетких регуляторов предложенным ме-

тодом нет необходимости в использовании пакета нечеткой логики системы MATLAB и процедура проектирования нечетких регуляторов упрощается. Нечеткий регулятор представляется в виде последовательного соединения трех блоков (см. рис. 1): 1 – формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$ , 2 – блока сравнения величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$  ( $u_c$  – ненормированное управляющее воздействие на выходе нечеткого регулятора на оси универсального множества  $U = [0, 1]$ ), 3 – блока нормировки выходной величины. Блочное построение регуляторов позволяет

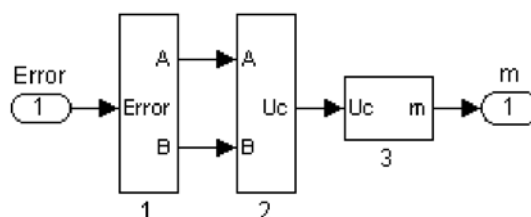


Рис. 1

выбирать и использовать различные блоки *формирователей величин*  $A(t)$  и  $B(t)$ , *блоки сравнения величин*  $A(t)$  и  $B(t)$  и *расчета*  $u_c$ , а также оптимизировать процессы в системах управления.

Ниже изложено проектирование нечеткого регулятора при идентичных колоколообразных функциях принадлежности.

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ**

**1. Аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных колоколообразных функциях принадлежности**

Рассмотрим нечеткий регулятор, на вход которого поступают ошибка системы  $\theta$ , скорость изменения (первая производная) ошибки  $\dot{\theta}$ , ускорение (вторая производная) ошибки  $\ddot{\theta}$ . Нечеткий регулятор практически реализуется на микроЭВМ (или микропроцессоре) и работает в дискретном режиме, поэтому на входе регулятора включается аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а на выходе – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). АЦП квантует непрерывную ошибку системы управления  $\theta(t) = u(t) - x(t)$  с шагом квантования  $h$ . В качестве первой и второй производных от ошибки обычно вычисляют первую и вторую разность по формулам

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= [\theta(k) - \theta(k-1)]/h; \\ \ddot{\theta}(k) &= [\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1)]/h = \\ &= [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)]/h^2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\theta(k)$  – квантованная ошибка на выходе АЦП. ЦАП представляет собой, как правило, фиксатор нулевого порядка с передаточной функцией  $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$ .

Пусть на универсальном множестве  $U = [0, 1]$  заданы два нечетких подмножества, функции принад-

лежностей (ФП) которых для каждой лингвистической величины определяются по формулам (см. рис. 2)

$$\mu_1(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu_2(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-1}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1].$$

При поступлении на нечеткий регулятор в какой-то фиксированный момент времени значений входных переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$  с шагом квантования  $h$  осуществляется пересчет входных переменных в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  на универсальном множестве  $U = [0, 1]$  и расчет значений ФП для этих переменных (см. рис. 2). Точками на универсальном множестве отмечены возможные для какого-то момента времени значения переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$ .

Для упрощения нормировки (пересчета значений сигналов в значения элементов единого универсального множества) диапазоны изменения входных сигналов (параметров нечеткого регулятора) принимаем симметричными, а именно

$$\begin{aligned} A_m &= \theta_{\max} = -\theta_{\min}, \quad B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}, \\ C_m &= \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}. \end{aligned}$$

Тогда формулы для нормировки (пересчета) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} u_1^* &= (\theta^* + A_m)/(2A_m); \\ u_2^* &= (\dot{\theta}^* + B_m)/(2B_m); \\ u_3^* &= (\ddot{\theta}^* + C_m)/(2C_m). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Лингвистическое правило управления нечеткого регулятора формулируется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{Если } (\theta^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \\ \text{то } (m^* = a_c^j), \quad j = \overline{1, 2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $a_1^j$ ,  $a_2^j$  и  $a_3^j$  – лингвистические оценки ошибки, первой производной ошибки и второй производной ошибки, рассматриваемые как нечеткие терм-множества, определенные на универсальном множестве,  $j = \overline{1, 2}$ ;  $a_c^j$  – лингвистические оценки управляющего воздействия на объект, выбираемые из терм-множества переменной  $m$ . Лингвистические оценки выбираются из терм-множеств лингвистических переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$ ,  $\ddot{\theta}^*$  и  $m^*$ :

$$a_i^j \in \{\text{отрицательная (1), положительная (2)}\}.$$

Другими словами, все сигналы (определенные выше лингвистические переменные) характеризуются как отрицательные ( $j = 1$ ) или положительные ( $j = 2$ ).

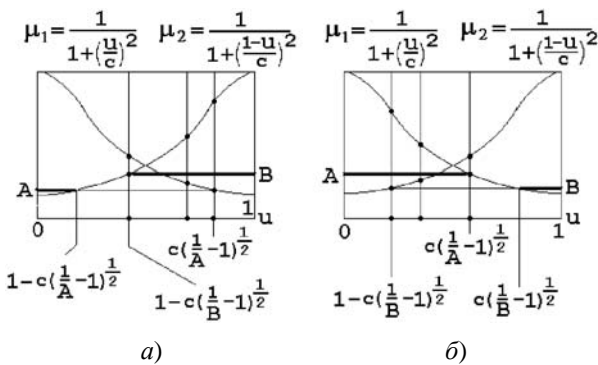


Рис. 2

Функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству «отрицательный» определяется из системы нечетких логических уравнений

$$\mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) = \mu_1(x_1) \wedge \mu_1(x_2) \wedge \mu_1(x_3). \quad (4)$$

Функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству «положительный» определяется из системы нечетких логических уравнений

$$\mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3) = \mu_2(x_1) \wedge \mu_2(x_2) \wedge \mu_2(x_3). \quad (5)$$

Результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия в соответствии с рабочим правилом ИР записывается в виде

$$\mu^m(x_1, x_2, x_3) = \mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) \vee \mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3). \quad (6)$$

В выражениях (4)–(6)  $\wedge$  – логическое «и»,  $\vee$  – логическое «или».

В соответствии с лингвистическими правилами управления функция принадлежности управляющего воздействия  $\mu_c^1(u)$  нечеткому множеству «отрицательный» ограничена сверху значением

$$A = \min[\mu_1(u_1^*), \mu_1(u_2^*), \mu_1(u_3^*)]; \quad (7)$$

функция принадлежности управляющего воздействия  $\mu_c^2(u)$  нечеткому множеству «положительный» ограничена сверху значением

$$B = \min[\mu_2(u_1^*), \mu_2(u_2^*), \mu_2(u_3^*)]. \quad (8)$$

Результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия на основании выражения (6) определяется как

$$\mu_c(u) = \mu_c^1(u) \vee \mu_c^2(u), \quad (9)$$

т. е. получается формированием максимума

$$\mu_c(u) = \max[\mu_c^1(u), \mu_c^2(u)]. \quad (10)$$

Для определения конкретного значения управляющего воздействия  $m^*$  формируется «результирующая фигура», ограниченная результирующей ФП и производится поиск абсциссы «центра тяжести результирующей фигуры»  $u_c$ .

Отметим весьма существенный факт. Какие бы значения не принимали переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  на универсальном множестве  $U = [0, 1]$ , в зависимости от соотношений величин  $A$  и  $B$  «результирующая фигура» может принимать только две конфигурации: при  $A \leq B$  первая конфигурация показана на рис. 2, а; при  $A \geq B$  вторая конфигурация показана на рис. 2, б.

Общая формула для определения абсциссы «центра тяжести результирующей фигуры» записывается в виде

$$u_c = \frac{\int_0^1 u \mu(u) du}{\int_0^1 \mu(u) du}. \quad (11)$$

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при  $A \geq B$  определяется по формуле

$$u_c = \frac{A \int_0^{1-\sqrt{\frac{1}{A}-1}} u du \int_{1-\sqrt{\frac{1}{B}-1}}^{1-\sqrt{\frac{1}{A}-1}} \frac{1}{1-\frac{1-u}{c}} u du + B \int_{1-\sqrt{\frac{1}{B}-1}}^1 u du}{A \int_0^{1-\sqrt{\frac{1}{A}-1}} u du \int_{1-\sqrt{\frac{1}{A}-1}}^{1-\sqrt{\frac{1}{B}-1}} \frac{1}{1-\frac{1-u}{c}} du + B \int_{1-\sqrt{\frac{1}{B}-1}}^1 du} \quad (12)$$

при  $A \leq B$ .

После несложных вычислений находим

$$u_c = \frac{\frac{A}{2} - c \left[ \sqrt{A-A^2} - \sqrt{B-B^2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{B}-1} - \arctg \sqrt{\frac{1}{A}-1} \right] - \frac{c^2}{2} \left[ \left( A - B - \ln \frac{c^2}{B} + \ln \frac{c^2}{A} \right) \right]}{A - c \left[ \sqrt{A-A^2} - \sqrt{B-B^2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{B}-1} - \arctg \sqrt{\frac{1}{A}-1} \right]} \quad (13)$$

при  $A \leq B$ .

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при  $A \geq B$  определяется по формуле

$$u_c = \frac{A \int_0^{1-\sqrt{\frac{1}{A}-1}} u du \int_{c\sqrt{\frac{1}{A}-1}}^{c\sqrt{\frac{1}{B}-1}} \frac{1}{1-\frac{u}{c}} u du + B \int_{c\sqrt{\frac{1}{B}-1}}^1 u du}{A \int_0^{1-\sqrt{\frac{1}{A}-1}} u du \int_{c\sqrt{\frac{1}{A}-1}}^{c\sqrt{\frac{1}{B}-1}} \frac{1}{1-\frac{u}{c}} du + B \int_{c\sqrt{\frac{1}{B}-1}}^1 du} \quad (14)$$

при  $A \geq B$ .

После несложных вычислений находим

$$u_c = \frac{\frac{B}{2} - \frac{c^2}{2} \left[ A - B - \ln \left( \frac{c^2}{B} \right) + \ln \left( \frac{c^2}{A} \right) \right]}{B + c \left[ \sqrt{A-A^2} - \sqrt{B-B^2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{B}-1} - \arctg \sqrt{\frac{1}{A}-1} \right]} \quad (15)$$

при  $A \geq B$ .

Полученное значение  $u_c$  затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления (при симметричном диапазоне изменения выходного сигнала  $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$ )

$$m^* = m_{\min}(1 - 2u_c) = 2D_m u_c - D_m. \quad (16)$$

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов.

При  $A = 0,2, B = 0,4, c = 0,3 \Rightarrow u_c = 0,5834$ . При  $A = 0,4, B = 0,2, c = 0,3 \Rightarrow u_c = 0,4166$ .

**2. Принципиальная схема нечеткого регулятора с идентичными колоколообразными функциями принадлежности**

Выполненная с использованием интерактивной системы MATLAB принципиальная схема нечеткого регулятора с идентичными колоколообразными функциями принадлежности, представлена на рис. 3.

Формирователь величин  $A(t)$  и  $B(t)$  реализован на основе формул (1), (2), (7) и (8). Элементами ограничения (*Saturation*) моделируем универсальное множество  $U = [0, 1]$ , на которое поступают переменные  $u_i, i = 1, 2, 3$ . В блоках Fcn, Fcn1, Fcn2 записываем аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_1(u)$ , а в блоках Fcn3, Fcn4, Fcn5 – аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_2(u)$ . На выходе блоков Fcn, Fcn1, Fcn2 получаем переменные  $\mu_1(u_i)$  (соответственно,  $\mu_1(u_1), \mu_1(u_2),$

$\mu_1(u_3)$ ), а на выходе блоков Fcn3, Fcn4, Fcn5 получаем переменные  $\mu_2(u_i)$  (соответственно,  $\mu_2(u_1), \mu_2(u_2), \mu_2(u_3)$ ).

Блок сравнения величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$  реализован на основе формул (13) и (15). На выходе верхнего сумматора формируется числитель, а на выходе нижнего сумматора формируется знаменатель выражения (13) и на выходе делителя Product4 формируется величина  $u_c$  при  $A \leq B$ . Аналогичным способом на выходе верхнего сумматора формируется числитель, а на выходе нижнего сумматора формируется знаменатель выражения (15) и на выходе делителя Product5 формируется величина  $u_c$  при  $A \geq B$ . Переключатель Switch замыкает верхний контакт при условии  $A \leq B$  (когда на среднем контакте сигнал положительный, в блоке Switch параметр Threshold = 0,000001). При условии  $A \geq B$ , когда на среднем контакте переключателя Switch сигнал отрицательный, переключатель замыкает нижний контакт. На выходе переключателя Switch получаем значение  $u_c$ .

Функции принадлежности в формирователе величин  $A(t)$  и  $B(t)$  называются входными, а в блоке срав-

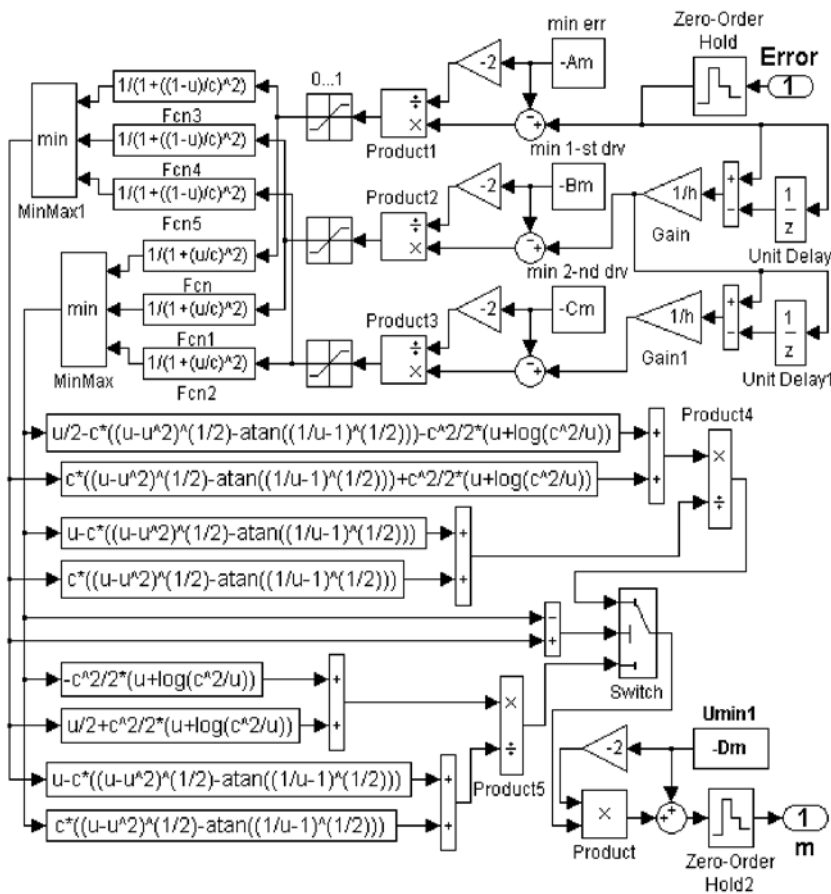


Рис. 3

нення величин  $A(t)$  і  $B(t)$  і расчета  $u_c$  називаються виходними. Для даного регулятора ці функції ідентичні.

Блок нормировки виходної змінної реалізований на основі формули (16).

### 3 Логика работы нечеткого регулятора

Логика работы нечеткого регулятора (см. рис. 3) для фиксированного момента времени отображена на рис. 4.

В формирователе величин  $A(t)$  и  $B(t)$  на входе нечеткого регулятора ошибка системы (Error)  $\theta^*$  квантуется АЦП (Zero-Older Hold), вычисляются первая (1-st drv)  $\dot{\theta}^*$  и вторая (2-nd drv)  $\ddot{\theta}^*$  разности от ошибки с шагом квантования  $h$  и значения входных переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$  пересчитываются в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  по формулам (2). Производится расчет значений входных функций принадлежности (см. рис. 4, а, б)

$$\mu_1(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu_2(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-1}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1]$$

для переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  и на выходе блоков Min-Max и MinMax1 на основе алгоритма Мамдани определяются, соответственно, величины А и В по формулам (7), (8).

Величины А и В поступают на блок сравнения величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$ , в котором производится расчет ненормированного выхода регулятора по формулам (13) и (15). Следует отметить, что блок сравнения реализует вычисление ненормированного выхода регулятора  $u_c$  для выходных функций принадлежности, которые идентичны входным (см. рис. 4, в, г), на основе формулы (11), вычисление которой при выходных функциях принадлежности, которые идентичны входным, приводит к окончательным формулам (13) и (15). Далее, полученное значение  $u_c$  в блоке нормировки выходной переменной пересчитывается в выходное напряжение регулятора по формуле (16).

В динамике на выходе блоков Product, Product1, Product2 структурной схемы формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$  получаем переменные  $u_i$  (соответственно,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ). Выражения (7) и (8) на каждом шаге  $h$  вычисляются в блоках MinMax и MinMax1, на выходе которых получают значения переменных  $A(t)$  и  $B(t)$  и в блоке сравнения по формулам (13)

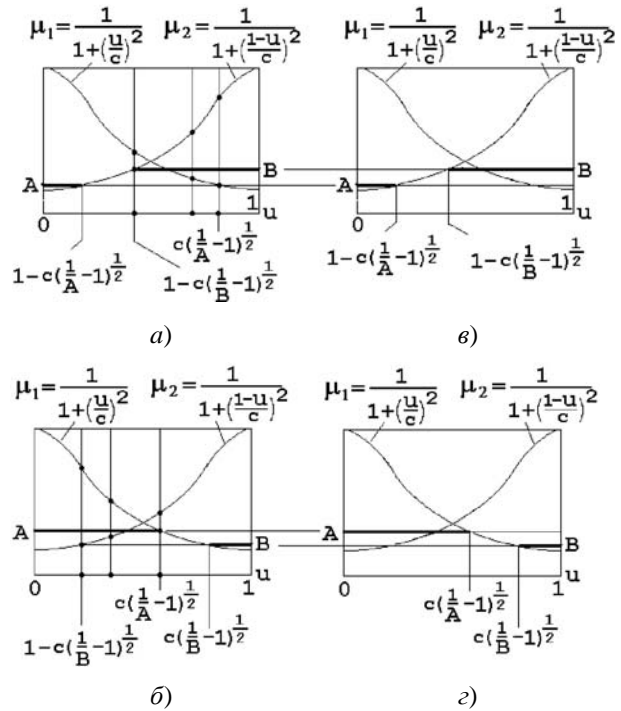


Рис. 4

и (15) вычисляются значения переменной  $u_c(t)$ , которые преобразуются блоком нормировки выходной переменной в значение управляющего воздействия на объект управления  $t(t)$ .

В схеме формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$  при настройке нечеткого регулятора перестраиваются граничные значения диапазонов  $A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min}$ ,  $B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}$ ,  $C_m = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$ . В блоке нормировки выходной переменной перестраиваются граничные значения диапазона  $D_m = t_{\max} = -t_{\min}$ .

### ВЫВОД

Изложенные теория и практическая схема нечеткого регулятора с идентичными колоколообразными функциями принадлежности дают возможность использовать такой регулятор в различных системах автоматического управления и путем настройки параметров регулятора добиваться высокого качества систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / Дьяконов В., Круглов В. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.
2. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / Гостев В. И. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с.
3. Гостев В. И. Новый метод проектирования одного класса нечетких цифровых регуляторов / Гостев В. И. //

Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 6. – С. 73–84.

Надійшла 24.03.2009

Гостев В. И.

#### ПРОЕКТУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ІДЕНТИЧНИХ ДЗВІНОПОДІБНИХ ФУНКЦІЯХ ПРИНАЛЕЖНОСТІ

Отримано аналітичні вирази для керуючих впливів на виході нечіткого регулятора при ідентичних дзвоноподібних функціях приналежності, викладено питання проектування нечіткого регулятора та запропоновано практичну схему нечіткого регулятора.

**Ключові слова:** автоматичне керування, нечіткий регулятор, проектування, нечітка логіка, функції приналежності, MATLAB.

Gostev V. I.

#### DESIGNING OF THE FUZZY CONTROLLER AT IDENTICAL BELL-SHAPED MEMBERSHIP FUNCTIONS

Analytical expressions for control actions at the input of a fuzzy controller are derived at identical bell-shaped membership functions, fuzzy controller designing problems are discussed and practical design of a fuzzy controller is proposed.

**Key words:** automatic control, fuzzy controller, design, fuzzy logic, membership functions, MATLAB.

УДК.621.316.7

Зиновкин В. В.<sup>1</sup>, Кулинич Э. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

<sup>2</sup>Старший преподаватель Запорожского национального технического университета

## КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА

Предложена структурно-алгоритмическая схема управления технологическим процессом приготовления газобетона. Управление осуществляется путем использования оптимизационных критериев градиентным методом по совокупности управляющих, контролируемых сигналов и исполнительных механизмов. Приведены результаты моделирования многопараметрической системы управления и испытаний в условиях работы установки на промпредприятии.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, многопараметрический технологический процесс, структурно-алгоритмическая схема, моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологическая установка производства газобетон является многомерным, стохастическим, со сложными взаимосвязями между совокупностью управляющих сигналов, контролируемых параметров и состояния исполнительных механизмов, объектом автоматизированного управления. Необходимость оценки показателей качества готовой продукции и хода технологического процесса усложняет процесс автоматизации.

Ведущими зарубежными фирмами разработаны эффективные технологические линии по производству газобетон с высоким уровнем автоматизации [1–4]. В них отмечается сложность и необходимость разработки систем автоматизированного управления технологическим процессом приготовления таких смесей, но методологические основы и принципы их построения практически отсутствуют [3, 5, 6].

Поэтому исследование и разработка многопараметрической системы управления технологическим процессом приготовления газобетон представляются актуальными и востребованными промышленностью Украины [7].

### ФОРМУЛИРОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Под многопараметрической системой автоматизированного управления технологическим процессом следует понимать совокупность управляемых программно управляющих блоков и алгоритмов, которые взаимодействуют между собой для обеспечения оптимального производственного цикла приготовления изделий из газобетона. Алгоритм включает совокупность программных предписаний, определяющих управление исполнительными механизмами для обеспечения необходимой последовательности выполнения полного цикла технологического процесса. В за-

© Зиновкин В. В., Кулинич Э. М., 2010