

15. Matlab System Identification Toolbox. Sozdanie lineynykh i nelineynykh modeley dinamicheskikh sistem po izmerennym dannym na vkhode i vykhode. Rukovodstvo po primeneniyu, MathWorks [Matlab System Identification Toolbox. The creation of linear and non-linear dynamic models of all systems to the measured data at the input and the output. Application guide, MathWorks]. Available at: <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/system-identification-toolbox.pdf>.
16. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 3-kh t. [Methods of classical and modern theory of automatic control: a Tutorial in 3 three vol.], Under ed. K.A. Pupkova. Vol. 2: Sintez regulyatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya [The controller synthesis and optimization theory of automatic control systems], Under ed. N.D. Egupova. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000, 736 p.
17. *Shlomo Engelberg*. A Mathematical Introduction to Control Theory. (Series in Electrical and Computer Engineering, vol.2) Imperial College Press, 2005.
18. *Gayduk A.R.* Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya po peredatochnym funktsiyam [Synthesis of automatic control systems by transfer functions], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1980, No. 1, pp. 11.
19. *D'yakonov V.P.* Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov [Matlab and Simulink for radio engineers]. Moscow: DMK Press, 2011, 976 p.
20. *Gul'tyaev A.K.* Matlab 5.2. Imitatsionnoe modelirovanie v srede Windows: Uchebnoe posobie [Matlab 5.2. Imitation modelling in Windows environment: a Training manual]. Moscow: Nauka, 1990, 288 c.
21. *Chen K., Dzhiblin P., Irving A.* MATLAB v matematicheskikh issledovaniyakh [MATLAB in mathematical research]. Moscow: Mir, 2001, 346 p.
22. Polunaturnoe modelirovanie. Bol'shaya Entsiklopediya nefi i gaza [Loop simulation. Big encyclopedia of oil and gas]. Available at: <http://www.ngpedia.ru/id159065p1.html> (accessed 3 April 2015)
23. *Gostev V.I.* Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami. Spravochnik [Control systems with digital controllers. Guide]. Kiev: Tekhnika, 1990, 280 p.
24. *Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael L. Workman.* Digital Control of Dynamic Systems. Addison-Wesley, 1997.
25. *Ioan D. Landau, Gianluca Zito.* Digital Control Systems. Design, identification and implementation. Springer-Verlag, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Соколов.

Ярцев Артем Викторович – Научно-технический центр «Техноцентр» Южного федерального университета; e-mail: artem91light@mail.ru; 347900, г. Таганрог, улица Петровская, 81; тел.: +78634311143; программист.

Yartsev Artyom Viktorovich – Scientific and Technical Center "Technocenter" Southern Federal University; e-mail: artem91light@mail.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634311143; programmer.

УДК 620.9:519.711

В.И. Финаев, Е.Д. Синявская, И.В. Пушнина

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ХЛЕБОПЕКАРНОЙ КАМЕРЕ

Цель и задачи данной работы состоят в разработке нечеткой модели управления производственными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, с последующей оценкой ее точности. Решение задачи управления при применении классической теории управления в условиях неопределенности не позволяет обеспечить эффективное управление производственными процессами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, и приводит к снижению точности результатов управления. Классическая теория управления не может учитывать неопределенность, а для многих трудноформализуемых производственных объектов управления невозможно найти точную

математическую модель. Решение поставленных задач в материалах статьи осуществлено следующим образом. Приведено обоснование применения методов теории нечетких множеств и нечеткой логики для управления производственными процессами, функционирующими в условиях априорной неопределенности. Разработана структура нечеткой модели, отличающаяся использованием оценки её эффективности. Определена последовательность действий при проектировании нечеткой модели управления производственными объектами. Рассмотрено назначение блоков модели. В качестве примера разработки нечеткой модели управления взят процесс управления температурой в камере для выпечки хлеба, что является актуальной задачей. Определены входные и выходные переменные, заданные на вербальном уровне, рассмотрено формирование экспертами правил принятия решений и приведен пример задания функций принадлежности нечетких переменных. Рассмотрены особенности вывода управляющего решения. Показан анализ результатов экспериментального исследования, направленных на подтверждение гипотезы о целесообразности применения нечетких методов для решения задач управления производственными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности. Результатом данной статьи является развитие системного подхода к решению задач управления термическими процессами, характерными для нефтеперерабатывающего, химического, металлургического, энергетического и пищевого производств в условиях неопределенности.

Управление; неопределенность; принятие решений; моделирование; термические процессы; печь для выпечки хлеба; адекватность модели.

V.I. Finaev, E.D. Sinajvskay, I.V. Pushnina

FUZZY CONTROL MODEL OF TEMPERATURE AT THE BREAD BAKING CHAMBER

The goal and problems of this paper consist in development of fuzzy model that is applied to control of production objects in the uncertainty conditions with following estimation of model's accuracy. The existing solving of this task by usage of classical control theory in the uncertainty conditions doesn't allow to provide effective controlling of the named objects and leads to reducing of results' accuracy. The classical control theory can't take into account uncertainty and also we can't develop the accurate mathematical model. The solving of the given problems is described in this paper in the following way. The usage of fuzzy set theory and fuzzy logic for control of production processes in the uncertainty conditions is proved. The structure of fuzzy model is developed. The offering structure distinguishes from others by usage of its estimation. The sequence of actions by development of fuzzy model for controlling of the production objects is determined. The function of model's blocks is considered. The fuzzy control model of production objects is developed by the example of temperature control's process at the baking chamber. The problem of effective control of temperature at the baking chamber is actual now. The inputs and outputs are set, that are set on the verbal level. Also the determining of make decision's rules by experts is considered and an example of membership functions' assignment is given. The features of control solution's inference are described. The analysis of experimental researches is carried out, the given data confirm a hypothesis of expedient applying of fuzzy methods for control tasks of production objects in the uncertainty conditions. Finally, the result of this paper consists in development of systems approach in the solving of control tasks of thermal processes, that are characterize oil-refining, chemical, metallurgical, power, food industries in the uncertainty conditions.

Control; uncertainty; making decision; modeling; thermal processes; baking oven; adequacy of model.

Введение. Многие химические, металлургические, энергетические и прочие производства объединяют термические процессы [1–3], что делает в чём-то сходными задачи автоматического и автоматизированного управления этими производствами, особенно в условиях недостаточной информации относительно моделей объектов управления и внешней среды. Объекты управления по многим признакам можно объединить в класс трудноформализуемых объектов управления (ОУ) [4, 5], которые представляют собой нелинейные и нестационарные ОУ с распределенными параметрами, функционирующие в условиях априорной неопределенности [6–9].

При решении задач управления неопределенность может иметь разную природу и по-разному влиять на состояние производственных объектов и на процесс управления этими объектами. К априорной неопределенности относят неточность, неполноту и недостоверность информации о рассматриваемом объекте и среде его функционирования [10,°11]. Для описания неопределенности лучше всего применять методы теории нечетких множеств и нечеткой логики [12–13], использующие качественные характеристики и лингвистические переменные для формализации неопределенности.

Преимущества методов теории автоматического управления [14,°15] состоят в том, что они предоставляют алгоритмы действий при разработке системы управления, математический аппарат и позволяют получить высокую точность результатов для определенного класса объектов. Однако теория автоматического управления не может учитывать неопределенность, а для многих трудноформализуемых производственных объектов управления невозможно найти точную математическую модель. Это приводит к неэффективному управлению производственными процессами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, и снижению получаемой точности результатов [16,°17].

Методы искусственного интеллекта основываются на нечеткой логике и теории нечетких множеств и позволяют учитывать априорную неопределенность данных, а также разрабатывать эффективные системы управления. Рассмотрим задачу разработки нечеткой модели управления производственными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности на примере управления температурой в хлебопекарной камере.

Структура нечёткой модели. Термические процессы охватывают нефтеперерабатывающее, химическое, металлургическое, горнодобывающее, энергетическое и пищевое производство. Основными объектами термического производства являются печи, котлы, топки и другое тепловое оборудование. Для этих объектов характерно отсутствие данных о статических и динамических характеристиках, наличие значительных запаздываний и тепловой инерции, сложность идентификации текущего состояния объекта, невозможность плавного изменения расхода топлива и перехода к другому температурному режиму [5, 18, 19]. Для термических процессов характерна работа в условиях априорной неопределенности, поэтому актуальной является задача нахождения эффективного метода управления и построения оптимальной модели управления.

К области термических процессов относятся процессы управления температурой в хлебопекарной камере, требующие контроля и регулирования температуры в соответствии с требуемыми параметрами технологического процесса. Решение данной задачи является актуальным [20–22].

Применение нечетких методов для разработки модели управления температурой в хлебопекарной камере определено [23] отсутствием математической модели объекта управления и необходимостью учёта априори неизвестных параметров, влияющих на функционирование и результаты процесса выпечки. К таким неизвестным параметрам относятся загрузка печи, изменение рецептуры, качество сырья, отклонение температуры от заданных значений, начальная температура тестовых заготовок.

В структуре нечеткой модели управления производственными объектами помимо её традиционной реализации предлагается применить оценку и при необходимости настройку ее параметров [24]. Последовательность действий при проектировании нечеткой модели управления производственными объектами: выбор типа алгоритма нечеткого логического вывода; экспериментальное исследование разработанной нечеткой модели; настройка параметров нечеткой модели управления производственными объектами.

Структура нечеткой модели управления производственными объектами состоит из блоков нечеткого алгоритма, оценки результатов моделирования и настройки параметров нечеткой модели. Структура нечеткой модели показана на рис. 1. Рассмотрим назначение блоков модели.

Блок «Среда функционирования производственного объекта управления» образован из производственного объекта управления, датчиков и исполнительного механизма. Датчики измеряют текущие значения параметров объекта управления и осуществляют ввод информации в систему управления. Исполнительные механизмы выполняют управляющее воздействие на производственный объект управления [15].

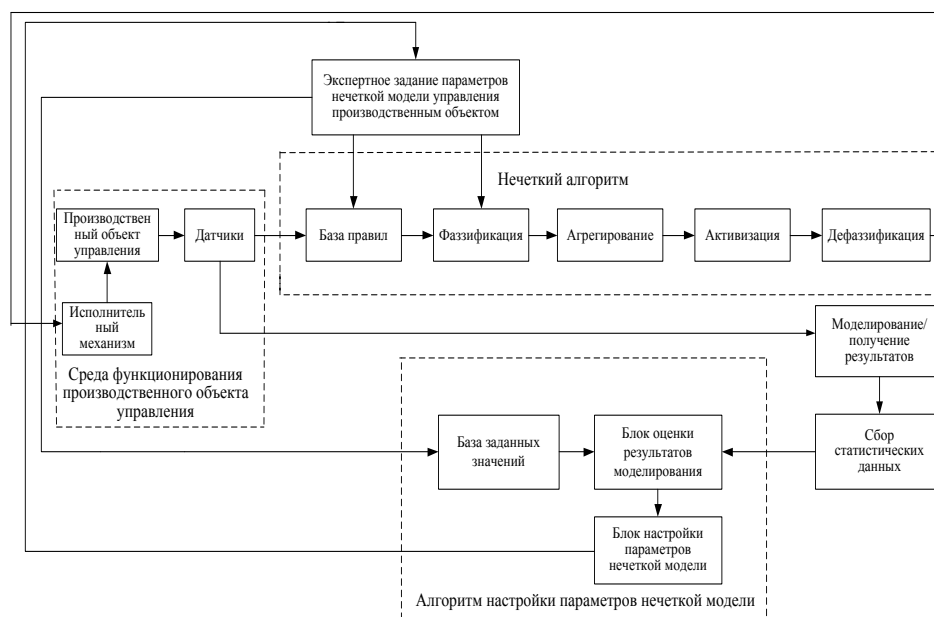


Рис. 1. Структура нечеткой модели управления производственными объектами в условиях априорной неопределенности

Блок «Нечеткий алгоритм» позволяет сформировать процесс управления в виде выбора одного из продукционных правил из общей базы правил, при этом применяются известные алгоритмы нечеткого логического вывода [25], причём, предлагается применить алгоритм Мамдани. Применение вербального задания переменных упрощает задание параметров производственного объекта управления и нахождение его математической модели. После завершения процесса дефаззификации выполняется моделирование, собираются статистические данные, описывающие взаимосвязь между входными и выходными воздействиями нечеткой модели управления производственным объектом.

Блок «Алгоритм настройки параметров нечеткой модели» включает в себя блок оценки результатов моделирования, базу заданных значений и блок настройки параметров нечеткой модели. Экспертная база заданных значений необходима для определения требуемых значений управления. В блоке оценки результатов моделирования сравниваются эмпирические значения выходных параметров и заданные в базе заданных значений. Процесс настройки позволяет корректировать параметры нечеткой модели управления.

Разработка нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере. Разработку нечеткой модели на примере управления температурой в хлебопекарной камере можно свести к следующей последовательности действий: задание параметров нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере; формирование базы правил; задание и построение ФП; вывод решения.

Для управления температурой в хлебопекарной камере определим множество входных нечетких переменных: T – текущее значение температуры в хлебопекарной камере: [100-300 °С]; Z – загрузка печи (количество выпекаемой продукции): [450; 500] кг; P – расход пара на 500 кг выпекаемой продукции: [90; 160] кг. Определим множество выходных лингвистических переменных двумя элементами: G – расход топлива с диапазоном: [13,5; 17,5] м³/ч; V – расход воздуха с диапазоном: [157,3; 161,2] м³/ч.

Схема нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере показана на рис. 2 [24].

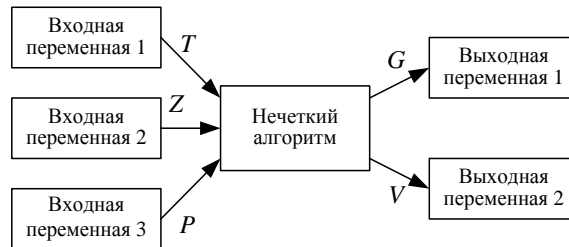


Рис. 2. Схема нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере

Зададим множества термов для входных и выходных лингвистических переменных. Терм-множество для входных переменных можно определить следующим образом:

- ♦ первая входная лингвистическая переменная T – «температура в хлебопекарной камере» имеет терм-множество $T = \langle T_1; T_2; T_3; T_4; T_5 \rangle$, где T_1 – низкая температура; T_2 – температура немного ниже средней; T_3 – средняя температура; T_4 – температура выше средней; T_5 – высокая температура;
- ♦ вторая входная лингвистическая переменная Z – «загрузка печи» имеет терм-множество $Z = \langle Z_1; Z_2; Z_3 \rangle$, где Z_1 – неполная загрузка печи; Z_2 – загрузка печи меньше нормы; Z_3 – нормальная загрузка печи;
- ♦ третья входная переменная P – «расход пара» имеет терм-множество $P = \langle P_1; P_2; P_3; P_4; P_5 \rangle$, где P_1 – расход пара практически отсутствует; P_2 – низкий расход пара; P_3 – средний расход пара; P_4 – расход пара выше среднего; P_5 – большой расход пара.

Определим терм-множество для выходных лингвистических переменных нечеткой модели управления:

- ♦ - первая выходная лингвистическая переменная G – «расход топлива» имеет терм-множество: $G = \langle G_1; G_2; G_3; G_4; G_5 \rangle$, где G_1 – низкий расход топлива; G_2 – расход топлива ниже среднего; G_3 – средний расход топлива; G_4 – расход топлива выше среднего; G_5 – большой расход топлива;
- ♦ - вторая выходная лингвистическая переменная V – «расход воздуха» имеет терм-множество $V = \langle V_1; V_2; V_3; V_4; V_5 \rangle$, где V_1 – низкий расход воздуха; V_2 – расход воздуха ниже среднего; V_3 – средний расход воздуха; V_4 – расход воздуха выше среднего; V_5 – большой расход воздуха.

Эксперты формируют базу правил: $P_z = \langle P_1, P_2, \dots, P_z \rangle$, где z – число правил в базе правил. В системах нечеткого вывода используются правила нечетких продукций, которые представляют собой взаимосвязь условия и заключения, например, «Если температура в хлебопекарной камере высокая и загрузка печи высокая, и расход пара большой, тогда расход топлива большой и расход воздуха большой».

Число правил в базе правил определяется, как произведение числа термов всех множеств входных переменных: $z = T \times Z \times P$. Для решаемой задачи число правил в базе правил равно 75-ти. Экспертная база правил проверяется на непротиворечивость, избыточность и согласованность.

Затем осуществляется задание функций принадлежности (ФП) нечетких переменных. Для построения ФП выбирается треугольная форма, как одна из самых распространенных и простых [25]. Результаты построения ФП показаны на рис. 3.

Затем эксперты задают требуемые значения для выходных сигналов, причём, входному состоянию соответствует выходное воздействие: $X = \{x_{ij}\} \rightarrow Y = \{y_{kv}\}$. Рассматриваемый объект управления определён многомерной нечеткой моделью, и надо учитывать влияние совокупности входных параметров. Предлагается использовать базу правил, где совокупность входных сигналов представляет собой условие продукционного правила и дает определенное заключение.

Состояние рассматриваемого производственного объекта определяется тремя лингвистическими входными переменными: T «температура в хлебопекарной камере», Z «загрузка печи», P «расход пара в печи». Так как нечеткая модель управления имеет две лингвистические выходные переменные: G «расход топлива» и V «расход воздуха», одна из которых изменяется относительно другой, то значения задаются только для первой из них.

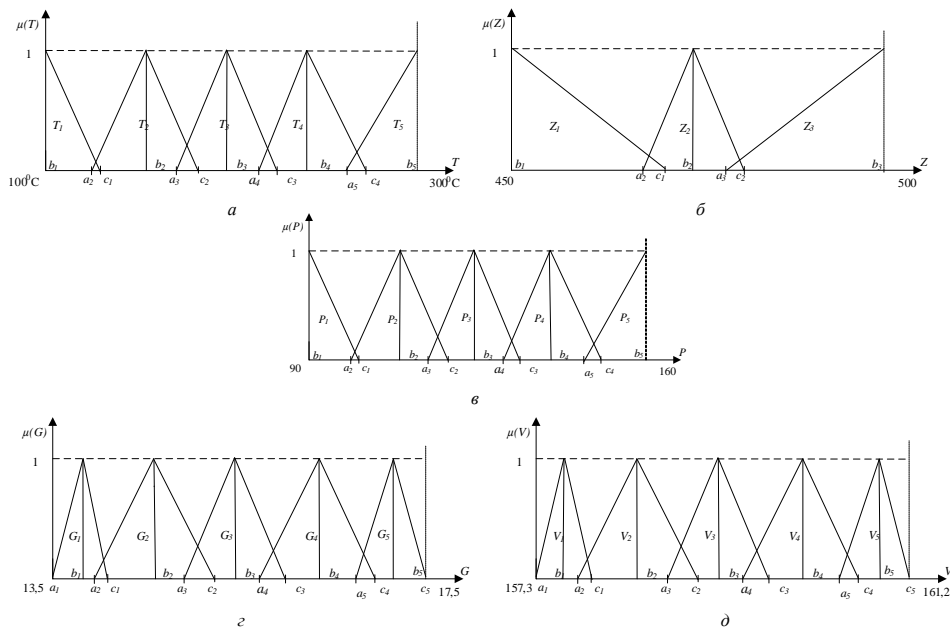


Рис. 3. Графики ФП нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере: а – ФП для нечеткой переменной T ; б – ФП для нечеткой переменной Z ; в – ФП для нечеткой переменной P ; г – ФП для нечеткой переменной G ; д – ФП для нечеткой переменной V

Некоторым правилам соответствуют одинаковые заключения, поэтому можно сгруппировать все правила в группы относительно их заключений. Для этих групп определяются требуемые значения выходных переменных.

Для определения заданных значений используется принцип объединения правил относительно выходной лингвистической переменной G «расход топлива в печи». Эксперты на основании режимов работы рассматриваемого производственного объекта управления определяют требуемые значения выходных переменных. Результаты работы нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере должны стремиться к заданным значениям выходной переменной.

Рассмотрим вывод решения. На этапе агрегирования подусловий включаются ФП отличные от 0, т.е.: $\mu_x(T) > 0$; $\mu_y(Z) > 0$; $\mu_e(P) > 0$; $\mu_w(G) > 0$; $\mu_l(V) > 0$. В составленных правилах условие состоит из нескольких подусловий, соединенных логической конъюнкцией «И». Поэтому на этапе агрегирования подусловий используется операция минимума

$$\mu'(X) = \min \{X_{ij}, \mu_i(X_{ij})\}. \quad (1)$$

На этапе активизации происходит определение степени истинности каждого из подзаключений нечетких правил. Выбранные правила ограничиваются исходя из активных заключений. Используется формула для min-композиции

$$\mu(Y) = \min \{b_{ue}, \mu_t(y_{kv})\}. \quad (2)$$

Цель аккумуляции заключается в том, чтобы объединить все степени истинности заключений для получения ФП каждой из выходных переменных. На этапе аккумуляции выбирается ФП с максимальным значением, используется операция объединения для ФП

$$\mu'(Y) = \max \{\mu(y_{kv})\}. \quad (3)$$

На этапе дефаззификации происходит нахождение обычного числового значения для каждой активной лингвистической переменной. Цель дефаззификации заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное числовое значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано внешними устройствами, по отношению нечеткой модели управления производственным объектом. Используется метод центра тяжести

$$G = \frac{\int_{\min}^{\max} y \times \mu(y) dy}{\int_{\min}^{\max} \mu(y) dy}, \quad (4)$$

где G – результат этапа дефаззификации; \min и \max – левая и правая точки носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной.

После этапа дефаззификации на выходе нечеткой модели получаются точные числовые значения, которые представляют собой сигналы управления. Затем выполняется экспериментальное исследование нечеткой модели управления производственным объектом, по результатам которого собираются статистические данные вход-выход нечеткой модели: $X = \{x_{ij}\} \rightarrow Y = \{y_{kv}\}$.

На вход поступают значения, характеризующие текущее состояние производственного объекта управления, на выходе выдаются управляющие воздействия. Собранный статистика позволит определить характер влияния входных воздействий на выходные, сформировать базу заданных значений управляющих сигналов и оценить точность работы нечеткой модели управления производственным объектом.

Оценка адекватности нечеткой модели управления. Затем выполняется анализ результатов экспериментального исследования. Определяется эффективность разработанной нечеткой модели и точность ее результатов без учета блока настройки ее параметров. Проводимые исследования направлены на подтвержде-

ние гипотезы о целесообразности применения нечетких методов для решения задач управления производственными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности.

В качестве оценки выберем среднеквадратическое отклонение (СКО) по расходу топлива. Для расчёта применим следующие формулы [6, °26, °27]:

$$СКО_{тек} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{тек} - y_{зад})^2}, \quad СКО_{тек} \leq СКО_{зад} \leq 5\% \quad (5)$$

где N – число реализаций моделирования; $СКО_{тек}$ – текущее значение ошибки; $СКО_{зад}$ – заданное значение ошибки; $y_{тек}$ – полученное значение переменной наблюдения; $y_{зад}$ – заданное значение переменной наблюдения.

Для проведения экспериментального исследования нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере осуществлено 1000 реализаций процесса моделирования. Результаты работы нечеткой модели для 1000 реализаций опытов (примеров) занесены в табл. 1.

В качестве оценок нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере представлены значения $СКО_{среднее}$ – среднее значение СКО по расходу топлива; $СКО_{min}$ и $СКО_{max}$ – минимальное и максимальное значения СКО по расходу топлива.

Таблица 1

Оценка адекватности нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере

Количество опытов	Параметры нечеткой модели				
	Входные параметры			Выходные параметры	
	$T, ^\circ C$	$Z, кг$	$P, кг$	$G, м^3/ч$	$V, м^3/ч$
1000	[106; 294]	[453; 500]	[91; 160]	[14,0099; 16,9949]	[157,849; 160,7852]
	Параметр оценки нечеткой модели				
	СКО				
	среднее	min		max	
	0,0125	0,0022		0,4642	

Выводы. Разработанная в данной статье нечёткая модель управления температурой в хлебопекарной камере в условиях неопределённости, отличается от ранее рассмотренных в других работах возможностью обобщения полученных результатов для решения задач управления любыми термическими процессами. Отличие данной нечёткой модели также состоит в том, что рассматривается одновременно оценка её адекватности.

Анализируя полученные значения параметров нечеткой модели управления температурой в хлебопекарной камере, можно сделать вывод, что среднее значение СКО за один цикл моделирования удовлетворяет поставленному условию (6) и не превышает 1,25 %. Однако значение СКО в отдельных примерах превышает пороговое значение 5 % (6), так, например, наибольшее значение составляет 0,4642 %.

Работа нечеткой модели управления производственными объектами, выполненная на примере управления температурой в хлебопекарной камере без учета блока настройки, дает удовлетворительные результаты процесса управления.

В качестве дальнейшего улучшения результатов применения нечеткой модели управления с целью достижения наилучших, оптимальных показателей, необходимо продолжить исследования в аспекте разработки методов и алгоритмов настройки параметров нечеткой модели управления производственными объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ревенков А.В., Резчикова Е.В. Теория и практика решения технических задач: Учебное пособие. - М.: Форум, 2008. – 384 с.
2. Вальков В.М., Вершин В.М. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. – 3-е изд. – Л.: Политехника, 1991. – 269 с.
3. Соснин О.М. Основы автоматизации технологических процессов и производств: Учебное пособие для студ. вузов. – М.: Академия, 2007. – 240 с.
4. Kang Jun, Wenjun Meng, Ajith Abraham, Hongbo Liu. An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control // Neurocomputing. – 2014. – № 135. – P. 79-85.
5. Yao-Qing Ren, Xiao-Gang Duan, Han-Xiong Li, C.L. Philip Chen. Dynamic switching based fuzzy control strategy for a class of distributed parameter system // Journal of Process Control. – 2014. – № 24. – P. 88-97.
6. Aydogan Savran, Gokalp Kahraman. A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes / ISA Transactions. – 2014. – № 53. – P. 280-288.
7. Escaco J.M., Bordons C., Vilas C., Garcia M.R., Alonso A.A. Neurofuzzy model based predictive control for thermal batch processes // Journal of Process Control. – 2009. – № 19. – P. 1566-1575.
8. Bartolomeo Cosenza, Mosè Galluzzo. Nonlinear fuzzy control of a fed-batch reactor for penicillin production // Computers and Chemical Engineering. – 2012. – № 36. – P. 273-281.
9. Pahola T. Benavides, Urmila Diwekar. Studying various optimal control problems in biodiesel production in a batch reactor under uncertainty // Fuel. – 2013. – № 103. – P. 585-592.
10. William L. Oberkampf, Jon C. Helton, Cliff A. Joslyn, Steven F. Wojtkiewicz, Scott Ferson. Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters // Reliability Engineering and System Safety. – 2004. – № 85. – P. 11-19.
11. Орлов А.И. Теория принятия решений: Учебник. – М.: Экзамен, 2006. – 573 с.
12. Didier D., Prade H. Resolution principles in possibilistic logic // International Journal of Approximate Reasoning. – 1990. – Vol. 4, Issue 1. – P. 1-21.
13. Zadeh L.A. The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems // Fuzzy sets and systems. – 1983. – Vol. 11, Issues 13. – P. 197-198.
14. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для студ. вузов. – СПб.: Политехника, 2002. – 302 с.
15. Гайдук А.Р. Системы автоматического управления. Примеры, анализ и синтез. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 415 с.
16. Новиков С.И., Шахнович В.Р., Сафронов А.В. Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций // Вестник ИГЭУ. - 2010. - Вып. 4. – С. 1-4.
17. Ульянов С.В. Тятюшкина О.Ю., Колбенко Е.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Научно-организационные, технико-экономические и прикладные аспекты // Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании». – 2011. – Вып. 2. – С. 1-23.
18. Antonio A. Alonso., Ana Arias-Méndez, Eva Balsa-Canto, Miriam R. García, Juan I. Molina, Carlos Vilas, Marcos Villafin. Real time optimization for quality control of batch thermal sterilization of prepackaged foods // Food Control. – 2013. – № 32. – P. 392-403.
19. Jin Woo Moon., Sung Kwon Jung, Youngchul Kim, Seung-Hoon Han. Comparative study of artificial intelligence-based building thermal control methods – Application of fuzzy, adaptive neuro-fuzzy inference system, and artificial neural network // Applied Thermal Engineering. – 2011. – № 31. – P. 2422-2429.
20. Данин В.Б., Кириков А.Ю. Оптимизация режима стабилизации температуры пекарной камеры на основе использования метода разделения движений // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Процессы и аппараты пищевых производств". – 2014. – Вып. 1 (17). – С. 1-9.
21. Paquet-Durand O., Solle D., Schirmer M., Becker T., Hitzmann B. Monitoring baking processes of bread rolls by digital image analysis // Journal of Food Engineering. – 2012. – № 111. – P. 425-431.
22. Zinedine Khatir, Joe Paton, Harvey Thompson, Nik Kapur, Vassili Toropov. Optimisation of the energy efficiency of bread-baking ovens using a combined experimental and computational approach // Applied Energy. – 2013. – № 112. – P. 918-927.
23. Синявская Е.Д., Финаев В.И. Автоматизация производственных процессов на хлебозаводах // Сборник материалов VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. «Информационные технологии, системный анализ и управление». – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 142-143.

24. *Синяевская Е.Д.* Анализ точности работы нечеткой модели и оптимизация ее параметров на примере управления температурой в хлебопекарной камере // *Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации»*. – Грозный: ГГНТУ имени академика М.Д. Миллонщикова, 2013. – Т. 1. – С. 95-100.
25. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
26. *Shang-Ming Zhou, John Q. Ganb.* Low-level interpretability and high-level interpretability: a unified view of data-driven interpretable fuzzy system modeling // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2008. – № 159. – P. 3091-3131.
27. *Oscar Cordón.* A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2011. – № 52. – P. 894-913.

REFERENCES

1. *Revenkov A.V., Rezhikova E.V.* Teoriya i praktika resheniya tekhnicheskikh zadach: Uchebnoe posobie [Theory and practice of solving technical problems: Tutorial]. Moscow: Forum, 2008, 384 p.
2. *Val'kov V.M., Vershin V.M.* Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Automated control systems of technological processes]. 3rd ed. Leningrad: Politehnika, 1991, 269 p.
3. *Sosnin O.M.* Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv: Uchebnoe posobie dlya stud. vuzov [Fundamentals of automation of technological processes and production: textbook for University students]. Moscow: Akademiya, 2007, 240 p.
4. *Kang Jun, Wenjun Meng, Ajith Abraham, Hongbo Liu.* An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control, *Neurocomputing*, 2014, No. 135, pp. 79-85.
5. *Yao-Qing Ren, Xiao-Gang Duan, Han-Xiong Li, C.L. Philip Chen.* Dynamic switching based fuzzy control strategy for a class of distributed parameter system, *Journal of Process Control*, 2014, No. 24, pp. 88-97.
6. *Aydogan Savran, Gokalp Kahraman.* A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes, *ISA Transactions*, 2014, No. 53, pp. 280-288.
7. *Escaco J.M., Bordons C., Vilas C., Garcia M.R., Alonso A.A.* Neurofuzzy model based predictive control for thermal batch processes, *Journal of Process Control*, 2009, No. 19, pp. 1566-1575.
8. *Bartolomeo Cosenza, Mosè Galluzzo.* Nonlinear fuzzy control of a fed-batch reactor for penicillin production, *Computers and Chemical Engineering*, 2012, No. 36, pp. 273- 281.
9. *Pahola T. Benavides, Urmila Diwekar.* Studying various optimal control problems in biodiesel production in a batch reactor under uncertainty, *Fuel*, 2013, No. 103, pp. 585-592.
10. *William L. Oberkampf, Jon C. Helton, Cliff A. Joslyn, Steven F. Wojtkiewicz, Scott Ferson.* Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters, *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, No. 85, pp. 11-19.
11. *Orlov A.I.* Teoriya prinyatiya resheniy: Uchebnik [The theory of decision making: a Tutorial]. Moscow: Ekzamen, 2006, 573 p.
12. *Didier D., Prade H.* Resolution principles in possibilistic logic, *International Journal of Approximate Reasoning*, 1990, Vol. 4, Issue 1, pp. 1-21.
13. *Zadeh L.A.* The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems, *Fuzzy sets and systems*, 1983, Vol. 11, Issues 13, pp. 197-198.
14. *Erofeev A.A.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik dlya stud. Vuzov [Automatic control theory: Textbook for student universities]. St. Petersburg: Politehnika, 2002, 302 p.
15. *Gayduk A.R.* Sistemy avtomaticheskogo upravleniya. Primery, analiz i sintez [Methods of fuzzy logic for automation of thermal processes in power plants]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2006, 415 p.
16. *Novikov S.I., Shakhnovich V.R., Safronov A.V.* Metody nechetkoy logiki v zadachakh avtomatizatsii teplovykh protsessov elektrostantsiy [Methods of fuzzy logic for automation of thermal processes in power plants], *Vestnik IGEU [Vestnik IGEU]*, 2010, Issue 4, pp. 1-4.
17. *Ul'yanov S.V., Tyatyushkina O.Yu., Kolbenko E.V.* Nечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Научно-организационные, технико-экономические и прикладные аспекты [Fuzzy models of intelligent industrial controllers and control systems. Scientific-organizational, technical, economic and applied aspects], *Elektronnyy zhurnal «Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii» [Electronic journal "System analysis in science and education"]*, 2011, Issue 2, pp. 1-23.

18. Antonio A. Alonso., Ana Arias-Méndez, Eva Balsa-Canto, Miriam R. García, Juan I. Molina, Carlos Vilas, Marcos Villafin. Real time optimization for quality control of batch thermal sterilization of prepackaged foods, *Food Control*, 2013, No. 32, pp. 392-403.
19. Jin Woo Moon., Sung Kwon Jung, Youngchul Kim, Seung-Hoon Han. Comparative study of artificial intelligence-based building thermal control methods – Application of fuzzy, adaptive neuro-fuzzy inference system, and artificial neural network, *Applied Thermal Engineering*, 2011, No. 31, pp. 2422-2429.
20. Danin V.B., Kirikov A.Yu. Optimizatsiya rezhima stabilizatsii temperatury pekarnoy kamery na osnove ispol'zovaniya metoda razdeleniya dvizheniy [Optimization of the mode of stabilization of the temperature of the baking chamber on the basis of the method of separation of motions], *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO Seriya "Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv"* [Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and equipment for food production"], 2014, Issue 1 (17), pp. 1-9.
21. Paquet-Durand O., Solle D., Schirmer M., Becker T., Hitzmann B. Monitoring baking processes of bread rolls by digital image analysis, *Journal of Food Engineering*, 2012, No. 111, pp. 425-431.
22. Zinedine Khatir, Joe Paton, Harvey Thompson, Nik Kapur, Vassili Toropov. Optimisation of the energy efficiency of bread-baking ovens using a combined experimental and computational approach, *Applied Energy*, 2013, No. 112, pp. 918-927.
23. Sinyavskaya E.D., Finaev V.I. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na khlebozavodakh [Automation of production processes in bakeries], *Sbornik materialov VIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie»* [The collection of materials of VIII all-Russian scientific conference of young scientists, postgraduates and students. "Information technology, system analysis and management"]. Taganrog: TTI YuFU, 2010, pp. 142-143.
24. Sinyavskaya E.D. Analiz tochnosti raboty nechetkoy modeli i optimizatsiya ee parametrov na primere upravleniya temperaturoy v khlebopekarnoy kamere [The analysis of the accuracy of a fuzzy model and optimization of its parameters on the basis of control temperature in the baking chamber], *Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Molodezh', nauka, innovatsii»* [Materials of the II all-Russian scientific-practical conference "Youth, science, innovations"]. Groznyy: GGNTU imeni akademika M.D. Millonshchikova, 2013. Vol. 1, pp. 95-100.
25. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [The design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 288 p.
26. Shang-Ming Zhoua, John Q. Ganb. Low-level interpretability and high-level interpretability: a unified view of data-driven interpretable fuzzy system modeling, *Fuzzy Sets and Systems*, 2008, No. 159, pp. 3091-3131.
27. Oscar Cordon. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, No. 52, pp. 894-913.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Финаев Валерий Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: finaev_val_iv@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Синявская Екатерина Дмитриевна – кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Пушнина Инна Валерьевна – кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Finaev Valeri Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: finaev_val_iv@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Sinyavskaya Ekaterina Dmitrievna – the department of automatic control systems; assistant.

Pushnina Inna Valerjevna – the department of automatic control systems; assistant.