

УДК 007.51

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В ВАКУУМНО-НАПЫЛИТЕЛЬНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

**Чернова М.А., Симонова Л.А., Абрамова В.В.**

*Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Набережные Челны, e-mail: smilby@mail.ru*

Управление на основе нечеткой логики применяется, когда входные параметры не являются дискретными, а принадлежат интервалу. Системы управления с нечеткой логикой функционируют по следующему принципу: показания измерительных приборов переводятся в нечеткий формат, выполняется логическое заключение с использованием правил базы знаний, затем переводятся в четкий вид и в виде обычных сигналов подаются на исполнительные устройства. В данной работе нечеткий вывод применяется для корректировки процесса. Определен вид функции принадлежности и характерные точки, по которым дискретное представление функции принадлежности аппроксимируется непрерывным аналогом – треугольной функцией принадлежности. Логический вывод был выполнен на основе продукционных правил предварительно составленной базы знаний с использованием лингвистических переменных. Проведено моделирование процесса управления напылением в вакуумно-напылительном технологическом комплексе на тестовом наборе данных. Проверен нечеткий вывод с помощью пакета программы MATLAB Fuzzy logic toolbox.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, база знаний, функция принадлежности, система управления

## APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN THE CONTROL SYSTEM OF A VACUUM SPUTTERING PROCESS IN THE CONTROL SYSTEM OF A VACUUM SPUTTERING PROCESS

**Chernova M.A., Simonova L.A., Abramova V.V.**

*Kazan (Volga Region) Federal University Branch in Naberezhnye Chelny,  
Naberezhnye Chelny, e-mail: smilby@mail.ru*

The management based on fuzzy logic is used when the input parameters are not discrete, but belong to the interval. Fuzzy system operate on the following principle: the meter readings are converted into the fuzzy format, the logical conclusion is performed using rules of knowledge base, converted into clear view and then in the form of conventional signals are fed to the actuators. The fuzzy inference is used to automatic correction technological process in this work. The form of the membership function and the characteristic points were defined. The discrete representation of the membership functions can be approximated by a continuous analog – the triangular membership function. The logical conclusion was made on the basis of the rules pre-compiled knowledge base by using the linguistic variables. The simulation of process control spraying in vacuum sputtering process complex was made on the test dataset. The fuzzy conclusion was checked using the by program package MATLAB Fuzzy logic toolbox.

**Keywords:** fuzzy logic, knowledge base, membership function, control system

Технологические промышленные процессы являются многомерными, нелинейными и динамическими, поэтому сложно обеспечить точное управление ими. В случаях, когда входные параметры не являются дискретными, а принадлежат интервалу, – применяется управление на основе нечеткой логики.

**Цель исследования** – провести анализ возможности применения элементов нечеткой логики в многоагентной системе управления с элементами искусственного интеллекта.

На основе полученных результатов проанализировать целесообразность применения принципов нечеткой логики для управления технологическим процессом напыления в вакууме.

Системы с нечеткой логикой функционируют по следующему принципу: показания измерительных приборов фазифи-

цируются (переводятся в нечеткий формат, в лингвистические переменные), обрабатываются – выполняется логическое заключение с использованием предварительно составленных правил базы знаний, дефаззируются и затем в виде обычных сигналов подаются на исполнительные устройства.

Рассмотрим нечеткий вывод на примере агента охлаждения [1]. Имеются следующие сигналы с датчиков (таблица).

На совокупности этих сигналов основывается работа Агента – охлаждение

Выявлены следующие закономерности [5]:  
A6: {T6, P6, T6.1, T6.2}

Если  $T6 > 100$  C, то Сообщение – Проверить контакты датчика

Если  $5 < T6 < 30$ , то – Нормальная работа, иначе сигнал нулевой

Если  $0,5 < P6.2 < 2$  атм, то Сообщение – Проверить на деформацию трубку Бурдона

Если  $P6.1 = \pm 100$  мкА, то Сообщение – Проверить катушку в которой движется ферритовый наконечник  
 Если  $P6.2 < 1$  атм, то Нормальная работа  
 Если  $T6.1 > 90$  С, то Сообщение – Проверить контакты датчика

Если  $40 < T6.1 < 90$ , то – Нормальная работа, иначе сигнал нулевой  
 Если  $T6.2 > 90$  С, то Сообщение – Проверить контакты датчика  
 Если  $25 < T6.2 < 90$ , то – Нормальная работа, иначе сигнал нулевой

Сигналы с датчиков агента охлаждения

№ п/п	Сигнал	Обозначение	Вариант происхождения	Обозначение
1.	Температура воды на входе	T6	Агент – охлаждение	A6
2.	Давление воды в трубе на входе (преобразователь)	P6.1		
3.	Давление воды в трубе на входе (манометр)	P6.2		
4.	Температура воды на выходе из насоса (паромасляного)	T6.1		
5.	Температура воды на выходе из магнетрона	T6.2		

Под нечётким множеством понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов универсального множества и соответствующих степеней принадлежности этих элементов в просматриваемом множестве. Степень принадлежности переменной  $x$  формализованному нечеткому множеству  $A$  характеризуется функцией принадлежности  $\mu_A(x)$ , которая принимает значения от 0 до 1, включая граничные значения. Чем выше степень принадлежности, тем в большей мере элемент универсального множества соответствует свойствам нечеткого множества [3].

В нечеткой логике значения любой величины представляются не числами, а словами естественного языка и называются термами. Число термов, их форма и область определения формируются из условий получения требуемого закона управления. Для установки вакуумной напылительной УВН-4М, предназначенной для нанесения магнетронным распылением металлов на поверхность изделий различной геометрической формы, экспертом выбрана треугольная функция принадлежности. Параметры треугольной функции принадлежности:  $a, c$  – диапазон изменения переменной;  $b$  – наиболее возможное значение переменной [3].

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x. \end{cases}$$

Определены ключевые точки, по которым дискретное представление функции принадлежности аппроксимируется.

Значение температуры преобразуется в лингвистическое, представленное тремя термами. Для «температуры воды на входе» (Temp\_on\_input) лингвистическая переменная температура определяется тремя множествами. Примем, что температура в 5°C и ее окрестности (0–10°C) является низкой (low\_input), 20°C – «нормальная» (normal\_input), температура в 35°C и ее окрестности (30–100°C) ассоциируется с высокой (high\_input) температурой.

Для «температуры воды на выходе из магнетрона» (Temp\_on\_output) лингвистическая переменная температура определяется тремя множествами. Примем, что температура в 25°C и ее окрестности (0–40°C) является низкой (low\_output), 60°C – «нормальная» (normal\_output), температура в 90°C и ее окрестности (80–100°C) ассоциируется с высокой (high\_output) температурой.

Для «температуры воды на выходе из насоса» (Temp\_pump) лингвистическая переменная температура определяется тремя множествами. Примем, что температура в 28°C и ее окрестности (0–35°C) является низкой (pump\_output\_low), 55°C – «нормальная» (pump\_output\_normal), температура в 85°C и ее окрестности (75–100°C) ассоциируется с высокой (pump\_output\_high) температурой.

Для «давления в трубе на входе» (Press) лингвистическая переменная температура определяется тремя множествами. Примем, что давление в 0,5 атм и его окрестности (0–0,8 атм.) является низким (press\_low), 1 атм. – «нормальное» (press\_normal),

давление в 2 атм. и его окрестности (1,5–3 атм.) ассоциируется с высоким (press\_high) давлением.

Фазификация переменной «температура воды на входе» (рис. 1).

Функции принадлежности термов:

$$1 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ \frac{x}{3}, & 0 \leq x \leq 3, \\ \frac{10-x}{7}, & 3 \leq x \leq 10, \\ 0, & x \geq 10; \end{cases}$$

$$2 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 10, \\ \frac{x-10}{10}, & 10 \leq x \leq 20, \\ \frac{30-x}{10}, & 20 \leq x \leq 30, \\ 0, & x \geq 30; \end{cases}$$

$$3 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 30, \\ \frac{x-20}{15}, & 20 \leq x \leq 35, \\ \frac{100-x}{65}, & 35 \leq x \leq 100, \\ 0, & x \geq 100. \end{cases}$$

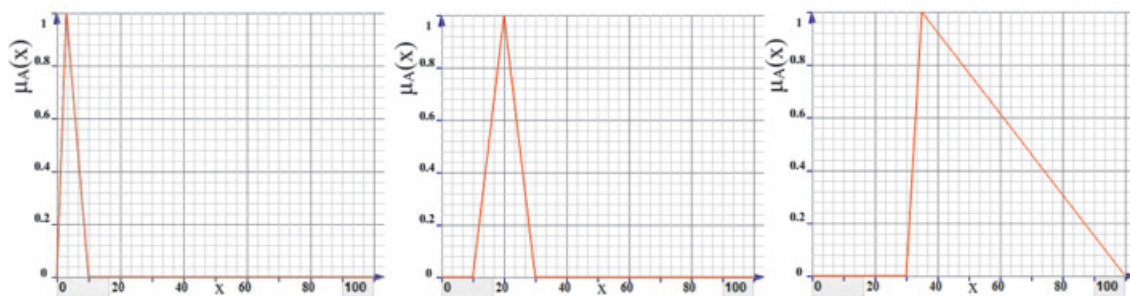


Рис. 1. Графическое представление функций принадлежности

Фазификация «температуры воды на выходе из магнетрона» (рис. 2).

Функции принадлежности термов:

$$1 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 20, \\ \frac{x-20}{5}, & 20 \leq x \leq 25, \\ \frac{40-x}{15}, & 25 \leq x \leq 40, \\ 0, & x \geq 40; \end{cases}$$

$$2 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 40, \\ \frac{x-40}{20}, & 40 \leq x \leq 60, \\ \frac{80-x}{20}, & 60 \leq x \leq 80, \\ 0, & x \geq 80; \end{cases}$$

$$3 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 80, \\ \frac{x-80}{10}, & 80 \leq x \leq 90, \\ \frac{100-x}{10}, & 90 \leq x \leq 100, \\ 0, & x \geq 100. \end{cases}$$

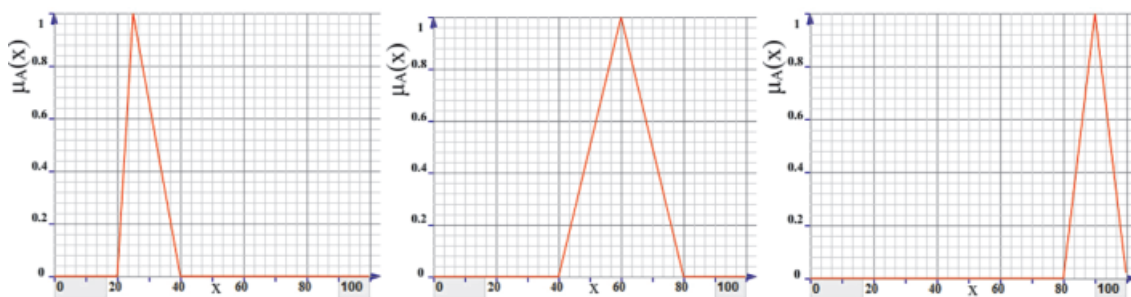


Рис. 2. Графическое представление функций принадлежности

Фазификация переменной «температуры воды на выходе из насоса» (рис. 3).  
 Функции принадлежности термов:

$$1 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 20, \\ \frac{x-20}{8}, & 20 \leq x \leq 28, \\ \frac{35-x}{7}, & 28 \leq x \leq 35, \\ 0, & x \geq 35; \end{cases}$$

$$2 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 35, \\ \frac{x-55}{20}, & 35 \leq x \leq 55, \\ \frac{75-x}{20}, & 55 \leq x \leq 75, \\ 0, & x \geq 75; \end{cases}$$

$$3 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 75, \\ \frac{x-75}{10}, & 75 \leq x \leq 85, \\ \frac{100-x}{15}, & 85 \leq x \leq 100, \\ 0, & x \geq 100. \end{cases}$$

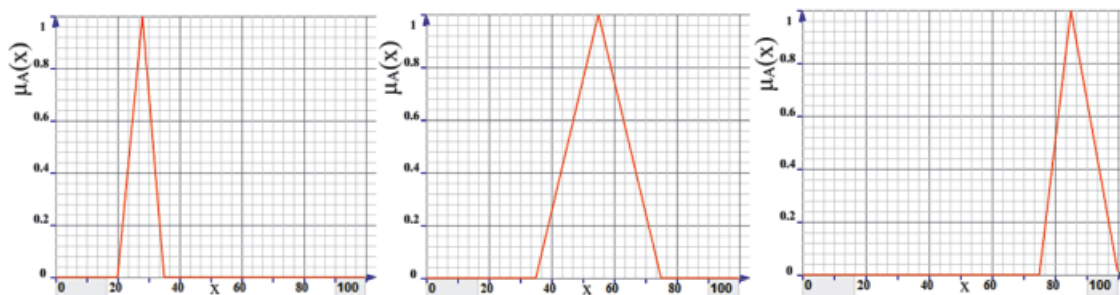


Рис. 3. Графическое представление функций принадлежности

Фазификация переменной «давление в трубе на входе» (рис. 4).

Функции принадлежности термов:

$$1 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ \frac{x}{0,5}, & 0 \leq x \leq 0,5, \\ \frac{0,8-x}{0,3}, & 0,5 \leq x \leq 0,8, \\ 0, & x \geq 0,8; \end{cases}$$

$$2 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 0,8, \\ \frac{x-0,8}{0,2}, & 0,8 \leq x \leq 1, \\ \frac{1,5-x}{0,5}, & 1 \leq x \leq 1,5, \\ 0, & x \geq 1,5; \end{cases}$$

$$3 \text{ терм: } \mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq 1,5, \\ \frac{x-1,5}{0,5}, & 1,5 \leq x \leq 2, \\ \frac{3-x}{1}, & 2 \leq x \leq 3, \\ 0, & x \geq 3. \end{cases}$$

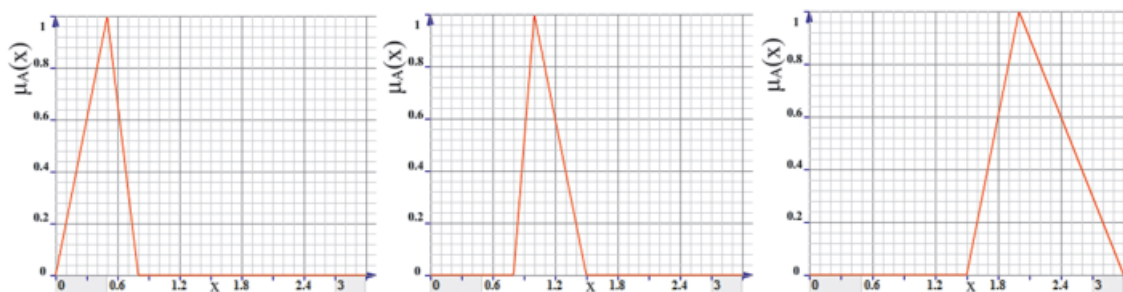


Рис. 4. Графическое представление функций принадлежности

Логическое заключение предполагает формирование выходной лингвистической переменной с помощью предварительно составленных продукционных

правил базы знаний. База знаний составляется опытным экспертом из прикладной области на основании ассоциативных правил и заключений, которыми бы стал

пользоваться оператор при управлении данным процессом [2].

Определили продукционные правила, связывающие лингвистические переменные.

ЕСЛИ Temp\_on\_input = low\_input И Temp\_on\_output = normal\_output И Temp\_pump = pump\_output\_normal И Press = press\_normal ТО Output = valve\_normal

ЕСЛИ Temp\_on\_input = normal\_input И Temp\_on\_output = normal\_output И Temp\_pump = pump\_output\_normal И Press = press\_high ТО Output = valve\_lower

ЕСЛИ Temp\_on\_input = normal\_input И Temp\_on\_output = normal\_output И Temp\_pump = pump\_output\_normal И Press = press\_low ТО Output = valve\_higher

ЕСЛИ Temp\_on\_input = normal\_input И Temp\_on\_output = normal\_output И Temp\_pump = pump\_output\_high И Press = press\_normal ТО Output = valve\_higher

ЕСЛИ Temp\_on\_input = normal\_input И Temp\_on\_output = high\_output И Temp\_pump = pump\_output\_normal И Press = press\_normal ТО Output = valve\_higher

Рассмотрим пример, когда «температура воды на выходе из магнетрона» 95°C, температура на входе 25°C, «температура воды на выходе из насоса» 60°C, «давление воды в трубе на входе» 1,5 атм. После фазификации получим, что степень принадлежности «температура воды на выходе из магнетрона» 95°C к терму высокий (pump\_output\_high) лингвистической переменной Temp\_on\_output равна 0,65. Степень принадлежности «температура на входе» 25°C к терму нормальный (normal\_input) лингвистической переменной Temp\_on\_input равна 0,5. Степень принадлежности «температура воды на выходе из насоса» 60°C к терму нормальный (pump\_output\_normal) лингвистической переменной Temp\_pump равна 0,8. Степень принадлежности «давление воды в трубе на входе» 1,5 атм к терму нормальный (press\_normal) лингвистической переменной Press равна 0,6.

Определили степень принадлежности всего antecedenta правила. Был использован оператор MIN, так как в правиле использована связка И. Вычислили минимальное значение степени принадлежности – ему присваивается меньшее значение

из сравниваемых термов входных лингвистических переменных.

$$\text{MIN}(0,5; 0,65; 0,8; 0,6) = 0,5.$$

Следующим этапом выполнили вывод. Использовали метод центра тяжести [4]. В качестве значения выходной переменной используется координата (абсцисса) центра тяжести площади результирующего термножества выходной лингвистической переменной. Вычисление координаты центра тяжести производится по следующей формуле:

$$y = \frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x\mu(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu(x) dx},$$

где  $[x_{\max}; x_{\min}]$  – носитель нечеткого множества выходной лингвистической переменной.

Взяв вычисленное значение степени принадлежности antecedenta посредством операторов MIN/MAX вычислили значение консеквента. Необходимо открыть вентиль на 62 градуса.

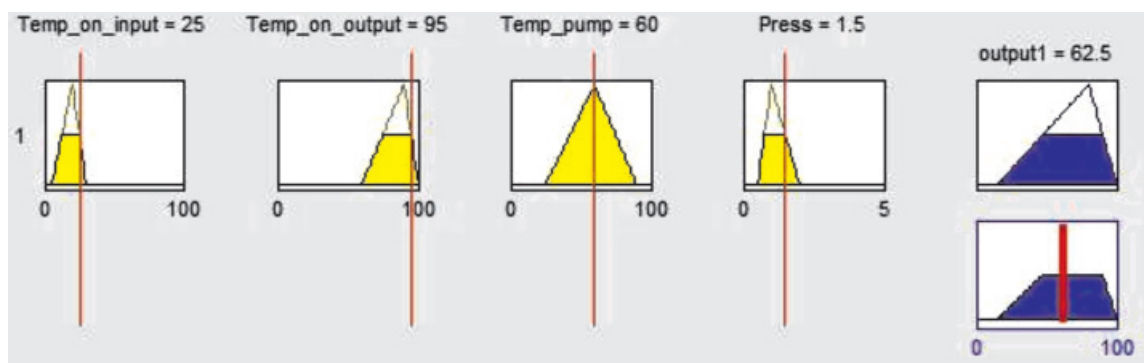


Рис. 5. Нечеткий вывод с помощью инструмента Fuzzy logic toolbox.

Проверили полученный нечеткий вывод с помощью пакета программы MATLAB Fuzzy logic toolbox. Завели все наши входные переменные, задали функции принадлежности, прописали в редакторе базы знаний RuleEditor правила. Указали значения входных переменных, программой был выполнен логический вывод.

Данная логика была апробирована и на других агентах установки вакуумной напылительной УВН-4М. Использование элементов нечеткой логики позволяет вводить в систему и работать с правилами управления, близкими к естественному языку. В базу знаний была заложена априорная информация о состоянии элементов установки вакуумной в виде нечетких правил управления. В системе управления предусмотрена возможность адаптации, создания новых правил в реальном времени к изменяющемуся параметрам объекта, взаимодействующего с окружающей средой. Был проверен блок принятия решений системы управления на основе элементов искусственного интеллекта.

В ходе технологического процесса ранее было трудно определить качество напыления и состояние элементов установки. Качество продукции могло быть установлено только по завершению технологического процесса. Для поиска причины брака требовалась остановка процесса напыления и участия эксперта. Был необходим визуальный осмотр всех ключевых элементов установки.

Система управления с нечетким выводом позволила не только устранить появление брака в процессе напыления или его подготовки, но и путем моделирования процесса исключить возможность его возникновения. Время принятия решения и поиска отклонений от режима, заданного оператором, уменьшилось на порядок.

Использование элементов искусственного интеллекта показало большие потенциальные возможности нечеткого вывода и эффективность их применения в управлении технологическим процессом напыления.

Система предлагает шаги по корректировке технологического процесса. Позволяет регулировать точность выходных и входных параметров в зависимости от заданного качества управления.

#### Заключение

Процесс нанесения магнетронным распылением металлов на поверхность изделий различной геометрической формы является наукоемким, требующим высокой квалификации оператора. Модель процесса является слишком сложной для получения оптимального решения в реальном масштабе времени. Использование принципов нечеткой логики для управления технологическим процес-

сом напыления в вакууме позволит снизить время простоя и количество брака. Правила, используемые в нечеткой логике, позволяют объединить полученный опыт и знания экспертов. Нечеткое управление оперирует теми же понятиями, в терминах которых формируются управляющие воздействия на заданном множестве входов. Уменьшает влияние исполнителя на качество конечного продукта, ускоряет процесс получения необходимой информации для принятия решения.

#### Список литературы

1. Абдуллин И.Ш., Исафилов И.Х., Симонова Л.А., Исафилов Д.И., Чернова М.А. Анализ системы автоматического управления вакуумно-напылительного технологического комплекса для легкой промышленности // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 24. – С. 160–163.
2. Исафилов Д.И. Управление плазменным технологическим комплексом для термообработки деталей с заданными прочностными характеристиками: дис. ... канд. тех. наук. – Наб. Челны. 2007. – С. 54–55.
3. Макаров И.М., Лохин И.М., Манко С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Наука, 2006. – С. 214–217.
4. Морозов В.К., Рогочев Г.Н. Моделирование информационных и динамических систем. – М.: Академия, 2011. – С. 127–129.
5. Chernova M.A., Simonova L.A., Israfilov D.I., Mathematical simulation of intelligent control system of metal vacuum sputtering process on the basis of application of multi-agent system // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 23, № 7. – P. 930–934.

#### References

1. Abdullin I.SH., Israfilov I. KH. Simonova L.A., Israfilov D.I., Chernova M.A. *Analiz sistemy avtomaticheskogo upravleniya vakuumno-napylitel'nogo tekhnologicheskogo kompleksa dlya legkoi promyshlennosti* («The control system analysis of vacuum sputtering technological complex for light industry») Bulletin of Kazan technology university. 2013. no. 24. pp. 160–163.
2. Israfilov D.I. *Upravlnie plazmennim tekhnologicheskim kompleksom dlya termoobrabotki deteleis zadannymi prochnostnyimi kharakteristikami* (Controlling the plasma technological complex for heat treatment of parts with specified strength characteristics) scientific diSSERTation. Nab. Chelny. 2007. pp. 54–55.
3. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., *Iskustvennii intellekt i intellektualnii sistemny upravleniya* (Intelligence and Intelligent Control System). Nauka Publ., 2006. pp. 214–217.
4. Morozov V.K., Rogochev G.N. *Modelirovaniye informatsionnykh i dinamicheskikh sistem* (Modeling of information and dynamic systems), Academy Publ., 2011. pp. 127–129.
5. Chernova M.A., Simonova L.A., Israfilov D.I., *Mathematical simulation of intelligent control system of metal vacuum sputtering process on the basis of application of multi-agent system*. World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 23 no. 7. pp 930–934.

#### Рецензенты:

Исафилов И.Х., д.т.н., профессор, заведующий Отделением энергетики и информатизации, Набережночелнинский институт (филиал), ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны;

Хабибуллин Р.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сервиса транспортных систем, Набережночелнинский институт (филиал), ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны.

Работа поступила в редакцию 16.12.2014.