

**М. В. Бобырь**, д-р техн. наук, проф., fregat\_mn@rambler.ru,  
**С. А. Кулабухов**, аспирант, kulabuhov.sergei@yandex.ru,  
**А. С. Якушев**, магистрант, alekseyakushev@yandex.ru,  
 Юго-Западный государственный университет, Курск

## Автономная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть II\*

*Представлена нечетко-логическая ММО-система для управления параметрами автономной системы охлаждения режущего инструмента на трехосевом фрезерном станке с ЧПУ, которая регулирует напряжение на затворе полевого транзистора, тем самым изменяя температуру элемента Пельтье, и напряжение на вентиляторе, используемом для охлаждения тепловой стороны элемента Пельтье.*

**Ключевые слова:** станок с ЧПУ, автономная охлаждающая система, нечеткая логика, элемент Пельтье, датчики температуры

### Введение

Автоматизация производственных процессов и обрабатывающих станков формирует серьезные требования к интеллектуальным системам, управляющим данными станками и процессами. На сегодняшний день применяются следующие интеллектуальные системы: экспертные, расчетно-логические, рефлекторные, гибридные интеллектуальные системы [1]. Гибридные интеллектуальные системы, в свою очередь, включают в себя: аналитические модели [2], экспертные системы [3], искусственные нейронные сети [4, 5], нечетко-логические системы [6, 7], генетические алгоритмы [8], имитационно-статистические модели [9]. В гибридной системе для решения поставленных задач применяется комбинация методов интеллектуальной имитации процессов или деятельности человека. При использовании вышеописанных методов автоматизации и интеллектуализации в производстве значительно снижается участие человека в производственном цикле, что, в свою очередь, увеличивает количество изготовленной продукции и снижает риск травмирования человека при контроле и обслуживании станков с ЧПУ [10, 11].

### Теоретическое описание построения нечетко-логических систем

Структура нечеткого вывода состоит из следующей последовательности действий. Вначале стро-

ится нечеткая база знаний, которая описывается правилами вида

$R_i: IF x_1 Is A_1^1, x_2 Is A_2^2, \dots, x_n Is A_n^m THEN y Is F_k,$

где  $x$  — четкие значения входных переменных;  $n$  — число входных переменных;  $m$  — число функций принадлежности  $y$  входных переменных;  $A_j^i$  — функции принадлежности входных переменных ( $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ );  $F_k$  — функция принадлежности выходной переменной;  $k$  — число функций принадлежности  $y$  выходной переменной.

Функции принадлежности могут задаваться треугольными, трапециевидными и другими функциями принадлежности. Для получения треугольной функции принадлежности используется формула

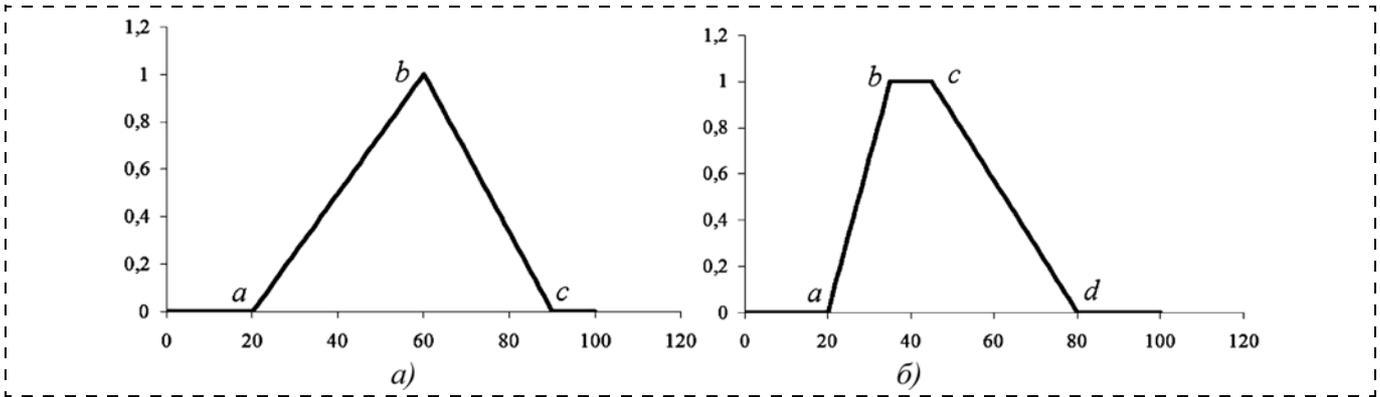
$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & x \geq c. \end{cases}$$

Для получения трапециевидной функции принадлежности используется формула

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 1, & b \leq x \leq c; \\ \frac{c-x}{c-b}, & c \leq x \leq d; \\ 0, & d \leq x. \end{cases}$$

Графическое представление данных типов функций принадлежности изображено на рис. 1.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-707.2017.8 и Госзадания: Соглашение № 2.3440.2017/ПЧ. Часть I опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2017, Т. 18, № 7.



**Рис. 1. Функции принадлежности:**  
*a* — треугольной формы; *б* — трапециевидной формы

Далее в предпосылках нечетких правил рассчитываются значения степеней принадлежности  $A_n^m(x_n)$  в зависимости от четких значений входных переменных. Затем на этапе импликации в зависимости от значений степеней принадлежности рассчитываются степени выполнения нечетких правил  $\beta_k$  с помощью *t*-норм: импликации Мамдани ( $I_M$ ), импликации алгебраического произведения ( $I_{Prod}$ ), импликации Лукасевича ( $I_L$ ) и импликации на основе мягких операторов ( $I_{Soft}$ ) [12]:

$$\beta_k = \begin{cases} \min_{i=1}^k [A_n^m(x_n)], & \text{if } I = I_M; \\ \prod_{i=1}^k [A_n^m(x_n)], & \text{if } I = I_{Prod}; \\ \min\left(1, 1 - \sum_{i=1}^k [A_n^m(x_n)]\right), & \text{if } I = I_L; \\ \frac{A_n^1(x_n) + A_{n-1}^1(x_{n-1}) + \delta^2 - \sqrt{[A_n^1(x_n) - A_{n-1}^1(x_{n-1})]^2 + \delta^2}}{2}, & \\ \delta = 0,05, & \text{if } I = I_{Soft}. \end{cases}$$

Здесь  $I$  — вид импликации.

В случае если нечеткие правила в своих заключениях ссылаются на одну и ту же выходную функцию принадлежности, то активируется то нечеткое правило, у которого степень выполнения максимальна:

$$\gamma_i = \max\{\beta_k | F_i\}.$$

На следующем этапе выполняется операция нечеткого пересечения выходных функций принадлежности со значениями активированных степеней выполнения нечетких правил:

$$F'_i(y) = \begin{cases} \min[\gamma_i, F_i(y)], & \text{if } I = I_M; \\ \gamma_i F_i(y), & \text{if } I = I_{Prod}; \\ \max(\gamma_i + F_i(y) - 1, 0), & \text{if } I = I_L; \\ \frac{\gamma_i + F_i(y) + \delta^2 - \sqrt{[\gamma_i - F_i(y)]^2 + \delta^2}}{2}, & \\ \delta = 0,05, & \text{if } I = I_{Soft}. \end{cases}$$

После этого осуществляется операция глобальной агрегации, на которой с помощью операции нечеткого объединения определяется нечеткая результирующая функция:

$$F'' = \max_{i=1}^k \{F'_i(y)\}.$$

На заключительном этапе рассчитывается четкое выходное значение с помощью одного из методов дефаззификации, например центра тяжести (Center of Gravity, CoG) [13]:

$$y_{CoG} = \frac{\int y dudy}{\int dudy}.$$

Данный алгоритм нечеткого вывода используется в автономной системе охлаждения режущего инструмента (см. Часть I).

### Нечетко-логическая MIMO-система для управления параметрами автономной системы охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ

В автономной системе охлаждения режущего инструмента используются два датчика температуры (см. Часть I). Данные датчики отслеживают температуры в зоне резания и непосредственно на теплой стороне элемента Пельтье [14, 15]. Определив температуру в двух зонах, необходимо провести регулировку напряжений на затворе полевого транзистора и на вентиляторе, охлаждающем теплую сторону элемента Пельтье. Путем изменения напряжения на затворе транзистора регулируется степень охлаждения термоэлемента Пельтье, а вентилятор, в свою очередь, предотвращает перегрев данного элемента. Для автоматизации и интеллектуализации процесса задания регулируемых напряжений авторами предложено применение нечетко-логической MIMO-системы (рис. 2) [16, 17].

Напряжение на затворе полевого транзистора, который управляет охлаждением элемента Пельтье, зависит от температуры в зоне резания, т.е. при большей температуре режущего инструмента и об-



Рис. 2. Нечетко-логическая MIMO-система для управления параметрами автономной системы охлаждения режущего инструмента

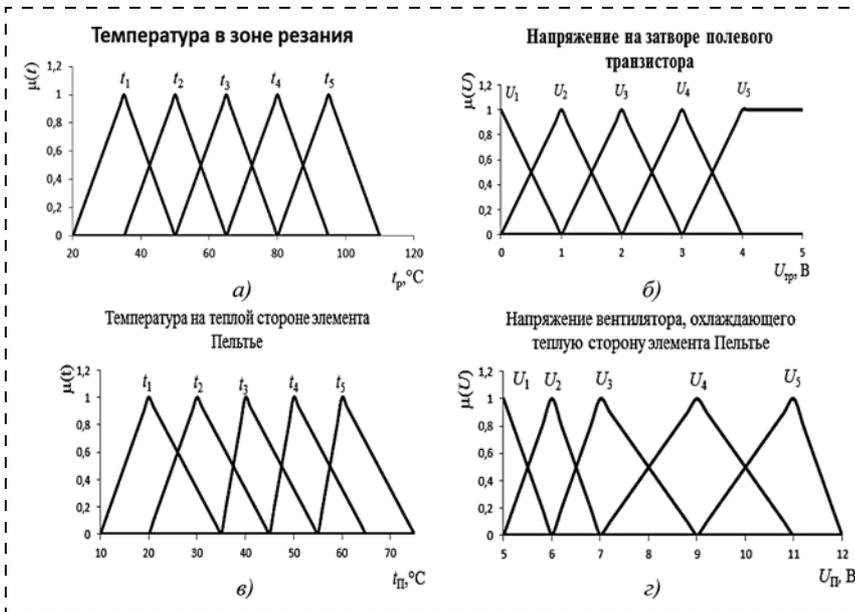


Рис. 3. Графики функций принадлежности: а, в — входные переменные; б, з — выходные переменные

рабатываемого материала необходимо подать большее напряжение на транзистор [18].

При работе элемента Пельтье необходимо отслеживать температуру на теплой стороне, чтобы избежать чрезмерного перегрева данного элемента. Вентилятор, обдувающий теплую сторону, охлаждает ее и предотвращает перегрев элемента. В случае если вентилятор работает постоянно и в максимальном режиме, происходит нецелесообразное расходование электроэнергии, а также ускоряется износ вентилятора. Чтобы избежать данной проблемы, авторами работы предложено использовать вентилятор только в случае необходимости, т.е. в случае низкой температуры теплой стороны снижать обороты или совсем останавливать вентилятор за счет снижения подаваемого на него напряжения, а в случае увеличения температуры теплой стороны повышать обороты вентилятора [19].

Рассмотрим нечетко-логическую MIMO-систему, имеющую две входные

$$t_p = \{t_{p1}\} + \{t_{p2}\} + \{t_{p3}\} + \{t_{p4}\} + \{t_{p5}\},$$

$$t_n = \{t_{n1}\} + \{t_{n2}\} + \{t_{n3}\} + \{t_{n4}\} + \{t_{n5}\},$$

и две выходные

$$U_{tr} = \{U_{tr1}\} + \{U_{tr2}\} + \{U_{tr3}\} + \{U_{tr4}\} + \{U_{tr5}\},$$

$$U_n = \{U_{n1}\} + \{U_{n2}\} + \{U_{n3}\} + \{U_{n4}\} + \{U_{n5}\},$$

переменные, где  $t_{p1}, \dots, t_{p5}$  — термы входной переменной нечеткого множества  $t_p$  (температура в зоне

резания);  $t_{n1}, \dots, t_{n5}$  — термы входной переменной нечеткого множества  $t_n$  (температура на теплой стороне элемента Пельтье);  $U_{tr1}, \dots, U_{tr5}$  — термы выходной переменной нечеткого множества  $U_{tr}$  (напряжение на затворе полевого транзистора);  $U_{n1}, \dots, U_{n5}$  — термы выходной переменной нечеткого множества  $U_n$  (напряжение на вентиляторе) [20].

Входные и выходные переменные описываются треугольными функциями принадлежности (ФП), графики которых представлены на рис. 3, где  $\mu(t), \mu(U)$  — функции принадлежности соответственно нечетких множеств  $t$  и  $U$  [21].

Диапазон температур в зоне резания составляет 20...110 °С, а напряжение на затворе полевого транзистора можно изменять в пределах 0...5 В. Диапазон температур теплой стороны элемента Пельтье 10...75 °С, а напряжение вентилятора можно изменять в пределах 0...12 В. Нечеткая база знаний задана нечеткими правилами (НП) и представлена в табл. 1.

Дефазификация проводилась на основе метода центра тяжести.

### Численное моделирование нечетко-логической MIMO-системы для управления параметрами автономной системы охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ

При использовании мягких и жестких арифметических операций в структуре нечеткого вывода получены графики результирующих переменных  $U$ , представленные на рис. 4.

Правильность работы нечетко-логических систем зависит от корректного выбора операторов импликации для конкретной решаемой задачи. Подбор необходимого оператора импликации позволяет избежать зон нечувствительности нечетко-логической системы. Авторами в данной работе для реализации нечетко-логического управления автономной системой охлаждения режущего инструмента промоделирована работа операторов нечеткой импликации, представленных в табл. 2.

В табл. 3 приведены графики зависимости напряжения на вентиляторе от температуры на теплой

Таблица 1

		Нечеткая база знаний				
		НП1	НП2	НП3	НП4	НП5
Если	$t_{p1}$	$t_{p2}$	$t_{p3}$	$t_{p4}$	$t_{p5}$	
ТО	$U_{tr1}$	$U_{tr2}$	$U_{tr3}$	$U_{tr4}$	$U_{tr5}$	
Если	$t_{n1}$	$t_{n2}$	$t_{n3}$	$t_{n4}$	$t_{n5}$	
ТО	$U_{n1}$	$U_{n2}$	$U_{n3}$	$U_{n4}$	$U_{n5}$	

Таблица 2

Операторы нечеткой импликации и формулы для их расчета

Оператор нечеткой импликации	Формула для расчета
Оператор импликации Мамдани (минимум)	$\mu_{A \rightarrow B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Произведение (Prod)	$\mu_{A \rightarrow B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x)$
Произведение Гамахера	$\mu_{A \rightarrow B}(x) = \frac{\mu_A(x) \mu_B(x)}{\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x)}$
Произведение Эйнштейна	$\mu_{A \rightarrow B}(x) = \frac{\mu_A(x) \mu_B(x)}{2 - (\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x))}$
Усиленное произведение	$\mu_{A \rightarrow B}(x) = \begin{cases} \min(\mu_A(x), \mu_B(x)); \\ \text{для } \max(\mu_A, \mu_B) = 1, \\ 0 \text{ в других случаях} \end{cases}$
Ограниченная разность	$\mu_{A \rightarrow B}(x) = \max(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1)$
Импликация Лукасевича	$\min(1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Импликация Клини—Динса	$\max(1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$
Импликация Клини—Динса—Лукасевича	$1 - \mu_A(x) + \mu_A(x) \mu_B(y)$
Импликация Гёделя	$\begin{cases} 1 \text{ для } \mu_A(x) \leq \mu_B(y), \\ \mu_B(y) \text{ в других случаях} \end{cases}$
Импликация Ягера	$(\mu_A(x))^{\mu_B(y)}$
Импликация Заде	$\max(1 - \mu_A(x), \min(\mu_A(x), \mu_B(y)))$

Таблица 3

Графики различных операторов нечеткой импликации

Оператор нечеткой импликации	График
Оператор импликации Мамдани (минимум)	
Произведение (Prod)	
Произведение Эйнштейна	
Усиленное произведение	
Ограниченная разность	
Импликация Лукасевича Импликация Клини—Динса Импликация Клини—Динса—Лукасевича Импликация Гёделя Импликация Ягера Импликация Заде	

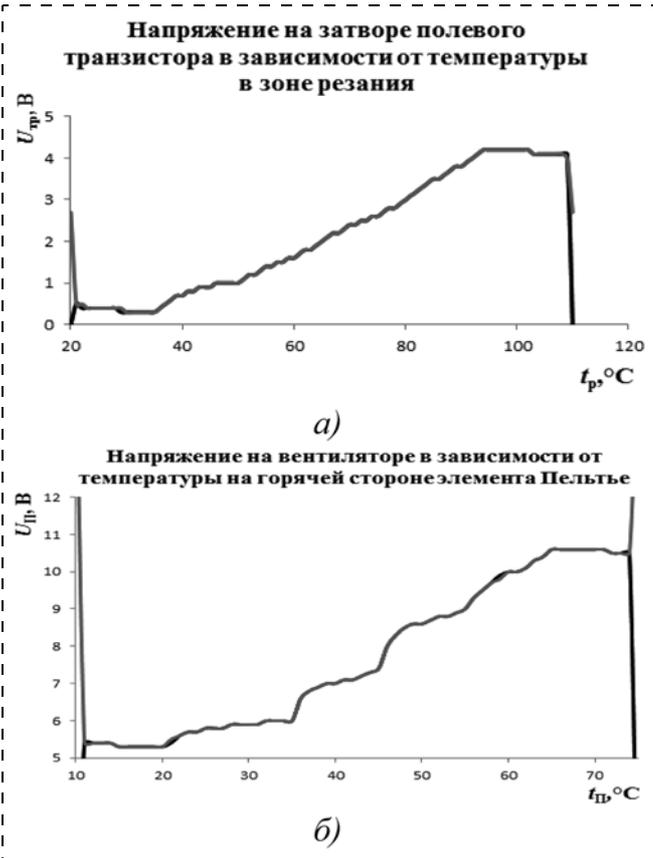


Рис. 4. Графики нечеткого вывода MIMO-системы: а — зависимость напряжения на затворе полевого транзистора от температуры в зоне резания; б — зависимость напряжения на вентиляторе от температуры на теплой стороне элемента Пельтье

стороне элемента Пельтье при использовании различных операторов импликации.

При использовании произведения Гамахера возникают ситуации, когда знаменатель равен нулю, что вызывает деление на ноль и формирует зоны нечувствительности нечетко-логической системы. Решает данную проблему произведение Эйнштейна. Измененный знаменатель исключает деление на ноль, тем самым уменьшается число зон нечувствительности.

При использовании усиленного произведения на графике видны всплески, которые также отрицательно влияют на систему.

При использовании импликаций Лукасевича, Клини—Динса, Клини—Динса—Лукасевича, Заде, Геделя, Ягера для данной системы возникает ситуация не изменения параметров, а именно их постоянства. Эта проблема возникает из-за того, что данные операторы нечеткой импликации предназначены для *MISO*-систем.

### Заключение

В результате моделирования нечетко-логической *MIMO*-системы для управления параметрами автономной системы охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ с использованием различных операторов нечеткой импликации были получены графики зависимости напряжения на вентиляторе от температуры на теплой стороне элемента Пельтье и проведено их сравнение. Было выявлено, что при использовании жестких арифметических операций наиболее правильно для данной системы использовать следующие операторы нечеткой импликации: Мамдани (минимум), произведение (Prod), произведение Эйнштейна, ограниченную разность. Использование произведения Гамахера, усиленного произведения, импликаций Лукасевича, Клини—Динса, Клини—Динса—Лукасевича, Заде, Геделя, Ягера не является правильным для автономной системы охлаждения. Наилучший результат получен при использовании мягких арифметических операций, при использовании которых нечетко-логическая *MIMO*-система формирует необходимые значения напряжений на затворе полевого транзистора и вентиляторе в зависимости от температур в зоне резания и на теплой стороне элемента Пельтье.

### Список литературы

1. **Игнатьев В. В.** Адаптивные гибридные интеллектуальные системы управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 12 (113). С. 89—94.
2. **Камчатный С. А., Кузнецов В. М., Сковородин А. В., Щербатов Н. Р.** Математическое моделирование процесса формообразования деталей конического передаточного механизма с ЭЦ-зацеплением // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2014. № 2. С. 5—17.

3. **Джамбеков А. М., Щербатов И. А.** Управление процессом каталитического риформинга на основе экспертной информации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 103—111.
4. **Алексеев П. П., Щербатов И. А.** Нейросетевая система управления вакуумным деаэратором ВД-400 // Вестник НГУЭУ. 2016. № 2. С. 263—275.
5. **Блинников А. Е.** Применение нейросетевых алгоритмов в решении задач оптимизации технологических процессов и оборудования литейного производства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12. С. 15—20.
6. **Седов В. А., Седова Н. А., Перечёсов В. С.** Нечеткая система удержания судна на курсе // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 1. С. 86—87.
7. **Бобырь М. В.** Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 7. С. 449—455.
8. **Бобырь М. В., Милостная Н. А.** Механизм адаптации нечеткой системы вывода на основе генетического алгоритма // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 3. С. 27—32.
9. **Филимонов Н. Б.** Гомеостатические системы и автомат ограниченной состояния управляемых динамических объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1998. № 1—2. С. 17.
10. **Yongjin K., Fischer G. W., Tzu-Liang T.** Fuzzy neuron adaptive modeling to predict surface roughness under process variations in CNC turning // Journal of manufacturing systems. 2002. Vol. 21. N. 6. P. 440—450.
11. **Earl-Juei Wang, Tai-Sheng Su, Ming-Hsien Chang.** Comparative study of the applicability of fuzzy multi-objective linear programming models through cost-effective analysis for mold manufacturing // Journal of manufacturing systems. 2013. Vol. 32. P. 206—219.
12. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
13. **Бобырь М. В.** Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11 (125). С. 28—35.
14. **Титов В. С., Бобырь М. В., Тевс С. С.** Выбор оптимальных параметров управления технологическим процессом методами нечеткой логики // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 5. С. 21—23.
15. **Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А.** Операционные системы реального времени для систем ЧПУ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 7. С. 31—33.
16. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Титов Д. В.** Оценка влияния числа обучаемых точек на аддитивность нечетких систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 10. С. 30—35.
17. **Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Милостная Н. А.** О некоторых свойствах моделирования адаптивных нейро-нечетких систем на основе упрощенного нечетко-логического вывода // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 5. С. 4—12.
18. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Милостная Н. А.** Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15—26.
19. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А.** Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9 (135). С. 32—41.
20. **Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А.** АСУ включением/выключением устройства удаления стружки и пыли на оборудовании с ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2006. № 12. С. 10—11.
21. **Бобырь М. В., Титов В. С., Нассер А. А.** Оценка числа итераций при обучении мягких нечетких систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 3 (54). С. 30—37.

# An Autonomous Cooling System for the Cutting Tool in the Task of Operation of CNC Equipment. Part II\*

M. V. Bobyr, fregat\_mn@rambler.ru✉, S. A. Kulabuhov, kulabuhov.sergei@yandex.ru,  
A. S. Yakushev, aleksejakushev@yandex.ru,  
South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation

Corresponding author: **Bobyr Maksim V.**, D. Sc., Professor,  
South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation,  
e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

Received on January 30, 2017

Accepted on April 07, 2017

This paper presents MIMO fuzzy logic system for control of the parameters of an autonomous system for cooling of the cutting tool on three axis milling machine with CNC, which controls voltage of the FET gate, thereby changing the temperature of the Peltier element, and the voltage on the fan used to cool the warm side of the Peltier element. Accordingly, the fuzzy logic control system has two input and two output variables. The input ones are the temperature in the cutting zone and the temperature of the warm side of the Peltier element, and the output voltage at the gate of a field effect transistor and the voltage at the fan. Simulation of the fuzzy logic system was carried out by numerical methods using soft and hard arithmetic operations, as well as different operators of fuzzy implications for hard arithmetic operations. In modeling of the fuzzy logic of MIMO system for control of the parameters of an autonomous system for cooling of the cutting tool in the task of operation of CNC equipment, different operators of the fuzzy implications were obtained and graphs were compared of the voltage on the fan and of the temperature on the warm side of the Peltier element. Their strong and weak points were identified. The best results were obtained employing the soft arithmetic operations, the use of which for the fuzzy logic of MIMO system generates the necessary voltage value for the gate of the MOSFET and the fan depending on the temperature in the cutting zone and on the warm side of the Peltier element.

**Keywords:** CNC machine, autonomous cooling system, fuzzy logic, Peltier element, temperature sensors.

**Acknowledgements:** The work was done with support of grant MD-707.2017.8 of RF President and state order: Agreement No. 2.3440.2017/PCH.

For citation:

**Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S.** An Autonomous Cooling System for the Cutting Tool in the Task of Operation of CNC Equipment. Part II, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 8, pp. 558–563.

DOI: 10.17587/mau.18.558-563

## References

1. Ignat'ev V. V. *Adaptivnye gibridnye intellektual'nye sistemy upravleniya* (Adaptive hybrid intellectual control systems), *Izvestiya Ju-FU. Tehnicheskie nauki*, 2010, no. 12 (113), pp. 89–94 (in Russian).
2. Kamchatnyj S. A., Kuznecov V. M., Skovorodin A. V., Shherbakov N. R. *Matematicheskoe modelirovanie processa formoobrazovaniya detalej konicheskogo peredatochnogo mehanizma s JeC-zacepleniem* (Mathematical simulation of the formbuilding of the conic driving gear details with ec-gearing), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i Mehanika*, 2014, no. 2, pp. 5–17 (in Russian).
3. Dzhambekov A. M., Shherbatov I. A. *Upravlenie processom kataliticheskogo reforminga na osnove jekspertnoj informacii* (Control of catalytic reforming process based on expert information), *Sistemy. Metody. Tehnologii*, 2014, no. 4 (24), pp. 103–111 (in Russian).
4. Alekseev P. P., Shherbatov I. A. *Nejrosetevaja sistema upravleniya vakuumnym deajeratorom VD-400* (Neural network control system of VD-400 vacuum deaerator), *Vestnik NGUJeU*, 2016, no. 2, pp. 263–275 (in Russian).
5. Blinnikov A. E. *Primenenie nejrosetevyh algoritmov v reshenii zadach optimizacii tehnologicheskikh processov i oborudovaniya litejnogo proizvodstva* (Application of neural networks in possessing a solution of technological processes designing optimization and foundry equipment), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2007, no. 12, pp. 15–20 (in Russian).
6. Sedov V. A., Sedova N. A., Perechjosov V. S. *Nechjotkaja sistema uderzhanija sudna na kurse* (Fuzzy system keep the vessel on course), *Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*, 2012, no. 1, pp. 86–87 (in Russian).
7. Bobyr' M. V. *Adaptacija sistemy upravlenija mobil'nym robotom na osnove nechetkoj logiki* (Adaptation of the mobile robot control system based on fuzzy logic), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 449–455 (in Russian).
8. Bobyr' M. V., Milostnaja N. A. *Mehanizm adaptacii nechetkoj sistemy vyvoda na osnove geneticheskogo algoritma* (The mechanism of adaptation fuzzy inference system based on genetic algorithm), *Promyshlennye ASU i kontrollery*, 2015, no. 3, pp. 27–32 (in Russian).
9. Filimonov N. B. *Gomeostaticheskie sistemy i avtomat ogranichenij sostojanija upravljajemykh dinamicheskikh obektov* (Homeostatic system and automatic limits the status of the managed dynamic objects), *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie*, 1998, no. 1–2, pp. 17 (in Russian).

10. Yongjin K, Fischer G. W., Tzu-Liang T. Fuzzy neuron adaptive modeling to predict surface roughness under process variations in CNC turning, *Journal of Manufacturing Systems*, 2002, vol. 21, no. 6, pp. 440–450.

11. Earl-Juei Wang, Tai-Sheng Su, Ming-Hsien Chang. Comparative study of the applicability of fuzzy multi-objective linear programming models through cost-effective analysis for mold manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, vol. 32, pp. 206–219.

12. Pegat, A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, BINOM. Laboratorija znaniy, 2013, 798 p. (in Russian).

13. Bobyr' M. V. *Vlijanie chisla pravil na obuchenie nechetko-logicheskoy sistemy* (Effect of number rule on training of fuzzy-logic systems), *Vestnik Kompjuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2014, no. 11 (125), pp. 28–35 (in Russian).

14. Titov V. S., Bobyr' M. V., Tevs S. S. *Vybor optimal'nykh parametrov upravlenija tehnologicheskim processom metodami nechetkoj logiki* (The choice of optimal parameters of technological process control methods fuzzy logic), *Promyshlennye ASU i Kontrollery*, 2003, no. 5, pp. 21–23 (in Russian).

15. Titov B. C., Bobyr' M. V., Milostnaja N. A. *Operacionnyye sistemy real'nogo vremeni dlja sistem ChPU* (Real-time operating systems for numerical control), *Promyshlennye ASU i Kontrollery*, 2008, no. 7, pp. 31–33 (in Russian).

16. Bobyr' M. V., Kulabuhov S. A., Titov D. V. *Ocenka vlijanija chisla obuchaemykh toček na additivnost' nechetkih sistem* (Assessing the impact of the number of trainees points additivity of fuzzy systems), *Promyshlennye ASU i kontrollery*, 2014, no. 10, pp. 30–35 (in Russian).

17. Bobyr' M. V., Emel'janov S. G., Milostnaja N. A. *O nekotorykh svojstvakh modelirovaniya adaptivnykh nejro-nechetkih sistem na osnove uprosihennogo nechetko-logicheskogo vyvoda* (Some properties of the simulation of adaptive neuro-fuzzy systems based on a simplified fuzzy inference), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushhie Sistemy*, 2014, vol. 12, no. 5, pp. 4–12 (in Russian).

18. Bobyr' M. V., Kulabuhov S. A., Milostnaja N. A. *Obuchenie nejro-nechetkoj sistemy na osnove metoda raznosti ploshhadej* (Teaching of neuro-fuzzy system on the basis of the method of difference areas), *Iskusstvennyj Intellekt i Prinjatie Reshenij*, 2016, no. 4, pp. 15–26 (in Russian).

19. Bobyr' M. V., Kulabuhov S. A. *Defazzifikacija vyvoda iz bazy nechetkih pravil na osnove metoda raznosti ploshhadej* (Defuzzification of fuzzy inference on the basis of the differential areas), *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij*, 2015, no. 9 (135), pp. 32–41 (in Russian).

20. Titov V. S., Bobyr' M. V., Milostnaja N. A. *ASU vključenijem/vyključenijem ustrojstva udalenija struzhki i pyli na oborudovanii s ChPU* (ACS on/off the device remove chips and dust on CNC equipment), *Avtomatizacija v promyshlennosti*, 2006, no. 12, pp. 10–11 (in Russian).

21. Bobyr' M. V., Titov V. S., Nasser A. A. *Ocenka chisla iteracij pri obuchenii mjagkih nechetkoj sistem* (The estimate of the number of iterations when learning soft fuzzy systems), *Izvestija Juzhno-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 3 (54), pp. 30–37 (in Russian).