

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-145-160>

## Нечеткое параллельно-конвейерное устройство и способ управления термоэлементом

М.В. Бобырь<sup>1</sup> ✉, Н.А. Милостная<sup>1</sup>, Д.О. Алтухов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»  
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Увеличение быстродействия работы нечеткого параллельно-конвейерного устройства, основанного на новом способе управления термоэлементом.

**Методы.** В процессе обработки изделия на оборудовании с ЧПУ возникает нагрев режущего инструмента и поверхности обрабатываемых деталей. Термические деформации снижают качество обработки поверхности заготовки. Для компенсации температурных деформаций используются различные методы: распыление смазочно-охлаждающей жидкости, охлаждение сжатым воздухом. Авторы предлагают использовать устройство для управления охлаждением, реализованное на термоэлементе Пельтье и ПЛИС семейства Spartan 3E. Для управления термическими погрешностями необходим постоянный контроль, при этом системы управления строятся на моделях искусственного интеллекта. Вследствие того, что входные переменные носят неопределенный характер, в работе используется нечеткая логика, которая позволяет описывать взаимосвязь между входными и выходными параметрами.

**Результаты.** Для вычисления значения силы тока, которое зависит от изменения входных параметров, разработана нечеткая математическая модель. Временные тесты, проведенные на частоте 50 МГц, показали, что для вычисления силы тока по разработанной математической модели требуется 380 нс. Для повышения быстродействия нечеткая математическая модель реализована на базе ПЛИС Spartan 3E. В работе была предложена универсальная формула для преобразования ток-напряжение. Результаты тестов показали, что расчет напряжения осуществляется за 190 нс. Было установлено, что устройство для управления термоэлементом выдает управляющий сигнал в течение 570 нс.

**Заключение.** В статье представлено устройство для управления температурным режимом в зоне обработки изделия. В данном устройстве управление термоэлементом осуществляется с помощью генератора тока, реализованного на операционном усилителе и биполярном транзисторе. Для того, чтобы на исполнительные механизмы станка с ЧПУ поступал сигнал напряжения, авторами разработано устройство для преобразования ток-напряжение, реализованное на ПЛИС. Для вычисления значения силы тока, которое зависит от изменения температуры в зоне резания, была разработана нечеткая MISO-модель. Проведенные временные тесты позволили установить, что быстродействие разработанного устройства в несколько раз выше имеющихся аналогов.

**Ключевые слова:** термоэлемент Пельтье; нечеткая логика; ПЛИС; мягкие вычисления, генератор тока.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Госзадания: Соглашение №2.3440.2017/4.6 и гранта РНФ №16-19-00186.

**Для цитирования:** Бобырь М.В., Милостная Н.А., Алтухов Д.О. Нечеткое параллельно-конвейерное устройство и способ управления термоэлементом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 145-160. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-145-160>.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019

Статья подписана в печать 17.07.2019

Статья опубликована 25.10.2019

## Fuzzy Parallel-Conveyor Device and Thermal Element Control Method

Maksim V. Bobyr<sup>1</sup> ✉, Natalia A. Milostnaya<sup>1</sup>, Dmitrii O. Altukhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Резюме

**Purpose of research.** Operation speed increase of fuzzy parallel-conveyor device based on a new method of thermal element controlling.

**Methods.** Cutting tool and part's surface are heated in the process of device handling using NC-machining technique. Thermal deformations reduce the surface of workpiece treatment quality. Various methods are used to compensate temperature deformations: spraying of lubricating-cooling liquid, cooling by compressed air. The device is proposed to be used for cooling control which is implemented on Peltier thermo element and FPLD Spartan 3E. Constant control is necessary to control thermal errors and control systems are built on artificial intellect models. As input parameters are indeterminate, fuzzy logic is used to describe the connection between input and output parameters.

**Results.** A fuzzy mathematical model has been developed to calculate current intensity. The intensity depends on the change of input parameters. Tests conducted at 50 MHz showed that 380 ns are necessary to calculate current intensity according to the developed mathematical model. Fuzzy mathematical model is implemented on the basis of FPLD Spartan 3E for faster operation. A universal formula for current-voltage transformation was developed. Test results showed that the voltage calculation is carried out in 190 ns. It was stated that thermo element control device produces a control signal within 570 ns.

**Conclusion.** The article describes a device for temperature controlling conditions in the product processing area. In this device thermal element controlling is done by a current generator implemented on an operational amplifier and on a bipolar transit generator. A device for current-voltage transformation is implemented on FPLD. It was developed to receive a pressure signal for NC-machining technique actuators to receive a pressure signal. A fuzzy MISO model has been developed to calculate current magnitude that depends on temperature change in the cutting zone. Conducted tests showed that the speed of this device is several times higher than present analogues.

**Keywords:** Peltier thermo element; fuzzy logic; FPLD; soft computing, current generator.

**Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Financing:** The research is done in RFFR №16-19-00186 and state task №2.3440.2017/4.6.

**For citation:** Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Altukhov D. O. Fuzzy parallel-conveyor device and thermal element control method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 145-160 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-145-160>.

Received 03.06.2019

Accepted 17.07.2019

Published 25.10.2019

## Введение

Одной из причин возникновения термических деформаций является трение между режущим инструментом и поверхностью заготовки. В статье [1] показано, что термические деформации приводят к неправильному позиционированию режущего инструмента относительно заготовки и снижению его точности. Они устраняются путем охлаждения поверхности заготовки, режущего инструмента и элементов станка [2]. Отсутствие системы охлаждения приводит к тому, что режущая кромка инструмента затупляется, вследствие чего производственные дефекты деталей увеличиваются. В исследованиях [3, 4] отмечается, что изменение параметров режима резания приводит к появлению термических деформаций, и вероятность скола на резце увеличивается. В станках с ЧПУ для охлаждения зоны резания и режущего инструмента используются следующие методы: распыление смазочно-охлаждающей жидкости [5], охлаждение сжатым воздухом [6]. Эти методы не подходят для обработки мягких материалов (дерево, пластик). Во время распыления смазочно-охлаждающей жидкости изменяется внешний вид и структура материала. При охлаждении сжатым воздухом необходимо использовать систему пылеудаления. Это вызывает увеличение энергопотребления станка с ЧПУ.

Для управления температурными погрешностями требуется постоянный

контроль и корректировка температуры в зоне резания, при этом системы управления строятся на моделях искусственного интеллекта [7, 8, 9]. Одним из эффективных направлений интеллектуальных систем является нечеткая логика. Положительная особенность нечетких систем это возможность применения их в условиях неопределенности и формирование управляющих решений [10]. Как правило, выходным сигналом нечетких моделей являются сигналы различной физической природы. Для управления приводами станка с ЧПУ нечеткие модели должны генерировать сигнал напряжения на своем выходе. В результате возникает несколько задач. Первая разработка устройства для преобразования физических параметров, полученных на выходе нечетких моделей, в сигнал напряжения, необходимого для передачи на исполнительные механизмы станка с ЧПУ. Вторая — это увеличение быстродействия работы устройства.

Следует отметить, что увеличение производительности возможно за счет программируемых логических контроллеров [11, 12]. При использовании устройств с параллельно-конвейерной обработкой, таких как ПЛИС, достигается повышение быстродействия обработки информации. Например, операция сложения  $a + b + c + d + e + f$  при последовательной обработке занимает 5 тактов, а в ПЛИС за счет параллельной

обработки данных – 2 такта. В статье рассмотрено решение этих двух задач.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом

Особенностью элемента Пельтье является то, что при прохождении постоянного тока через термоэлемент тепло выделяется с его одной стороны, а холод – с другой стороны. Холодную сторону термоэлемента авторы предлага-

ют использовать для охлаждения зоны резания при обработке деталей на оборудовании с ЧПУ.

Структурно-функциональная схема устройства на основе ПЛИС для управления охлаждением деталей при их обработке на станке с ЧПУ представлена на рис. 1. Особенностью схемы является использование устройства для вычисления тока на основе нечеткой математической модели преобразования ток-напряжение.

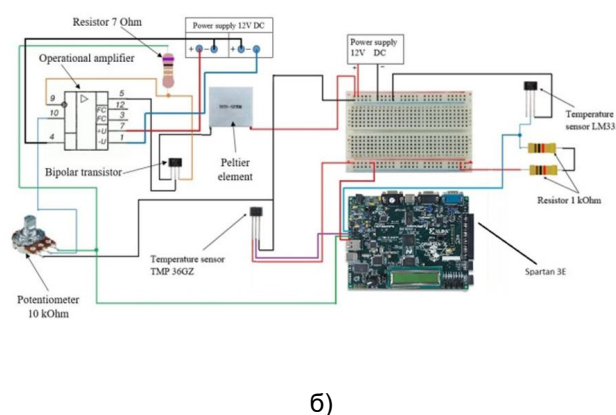
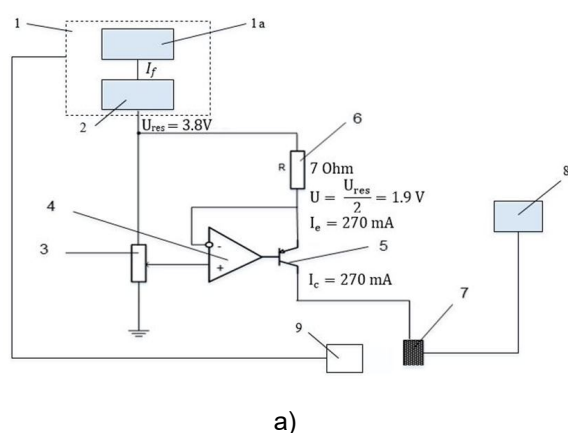


Рис. 1. Устройство управления термоэлементом на основе генератора тока: а – структурная схема, где 1 – ПЛИС, 1а – нечеткое устройство для вычисления силы электрические тока, 2 – устройство преобразования напряжения, 3 – цифровой потенциометр, 4 – операционный усилитель, 5 – биполярный транзистор, 6 – резистор, 7 – термоэлемент Пельтье, 8 – источник питания, 9 – датчик температуры, 10 – блок электроники для управления системой охлаждения;  $t$ ,  $s$ ,  $v$  – температура режущего инструмента, подача на оборот, скорость резания; б – электрическая схема

Fig. 1. Thermal element control device on the basis of current generator: (a) block diagram, Where 1 – FPLD, 1a - fuzzy device for electric current strength calculation, 2 – voltage transformation device, 3 – digital potentiometer, 4 – operational amplifier, 5 – bipolar transistor, 6 – resistor, 7 – Peltier thermal element, 8 – power supply, 9 – temperature sensor, 10 – electronic unit for cooling system control;  $t$ ,  $s$ ,  $v$  – cutting tool temperature, feed per revolution, cutting speed; б – electrical diagram

Устройство для управления термоэлементом на основе генератора тока работает следующим образом: сила тока, передаваемая термоэлементу 7, рассчитывается в ПЛИС (рис. 1а) по формуле (7). После этого ток преобразуется

в сигнал напряжения  $U_{res}$  (1) (рис. 1а) и передается на потенциометр 3. Потенциометр 3 установлен на 50% и делит напряжение пополам. Таким образом, напряжение на неинвертирующем входе операционного усилителя 4 будет равно

$U = U_{res}/2$ . Операционный усилитель выполнен по схеме повторителя напряжения (усилитель с единым коэффициентом усиления). Поэтому напряжение в точке подключения резистора 6 и инвертирующего входа операционного усилителя будет равно  $U_{res} / 2$ . Ток эмиттера равен  $I_{\Sigma} = U/R = U_{res} / 2R$ .

Таким образом, на термозлемент 7 подается ток коллектора, примерно равный току эмиттера  $I_k = U_{res}/2R$ , поскольку в биполярном транзисторе 5 токи эмиттера и коллектора  $I_{\Sigma} = I_k$  примерно равны друг другу.

## 2.2. Устройство для преобразования ток-напряжение

Как было сказано выше, выходные сигналы в нечетких системах управления имеют разную физическую природу. Например, в нашем устройстве управления термозлементом на основе управляемого генератора тока на выхо-

де формируется сигнал силы тока. Данный сигнал невозможно передать на исполнительные механизмы станка с ЧПУ. Следовательно, возникает задача преобразования значения силы тока в сигнал напряжения. Авторами разработано устройство для преобразования ток-напряжение, реализованное на ПЛИС. Устройство преобразует ток в напряжение по универсальной формуле

$$U_{res} = U_{min} + \frac{(I_f - I_{min}) \cdot (U_{max} - U_{min})}{I_{max} - I_{min}}, \quad (1)$$

где  $I_{min}$  и  $I_{max}$  – минимальная и максимальная допустимая сила тока;  $I_f$  – действующее значение силы тока;  $U_{min}$  и  $U_{max}$  – минимальное и максимальное напряжение в пределах которого происходит регулирование напряжения, подаваемого на исполнительные механизмы.

Расчетная схема устройства для преобразования ток-напряжение показана на рис. 2.

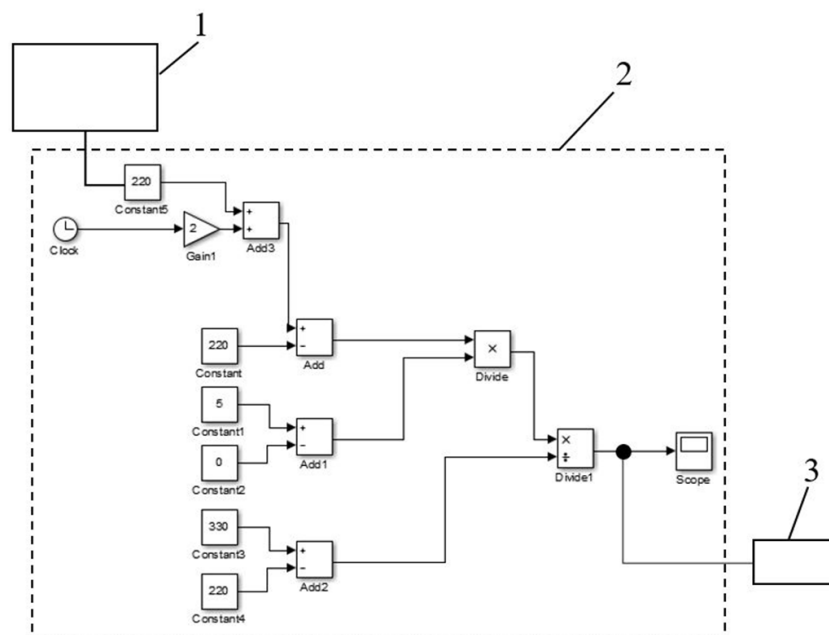


Рис. 2. Устройство для преобразования ток-напряжение: 1 - ПЛИС; 2 - преобразователь напряжения; 3-цифровой потенциометр

Fig. 2. Current-to-voltage converter: 1 - FPLD; 2 - voltage converter; 3-digital potentiometer

### 2.3. Нечеткая модель управления термоэлементом

Нечеткая математическая модель вычисляет значение силы тока, которое зависит от изменения температуры в зоне резания для устройства управления термоэлементом. Нечеткая MISO-модель состоит из трех входных и одной выходной переменной. Методы построения нечетких систем рассмотрены в статьях [13-15]. Входами нечеткой модели являются значения температуры в

зоне резания  $t$ , °C (от датчика температуры TMP36GZ, рис. 1), текущие параметры режима резания: подача  $S$  (мм/об) и скорость резания  $V$  (мм/с). Каждая из входных переменных имеет три функции принадлежности:  $t = [t_1; t_2; t_3]$ ;  $S = [S_1; S_2; S_3]$ ;  $V = [V_1; V_2; V_3]$  (рис. 3, а, б, в). Выходной переменной является значение силы тока  $I$ , (мА), передаваемого на термоэлемент Пельтье. Выходная переменная задается одиннадцатью синглтонами:  $I = [I_1; I_2; I_3; I_4; I_5; I_6; I_7; I_8; I_9; I_{10}; I_{11}]$ .

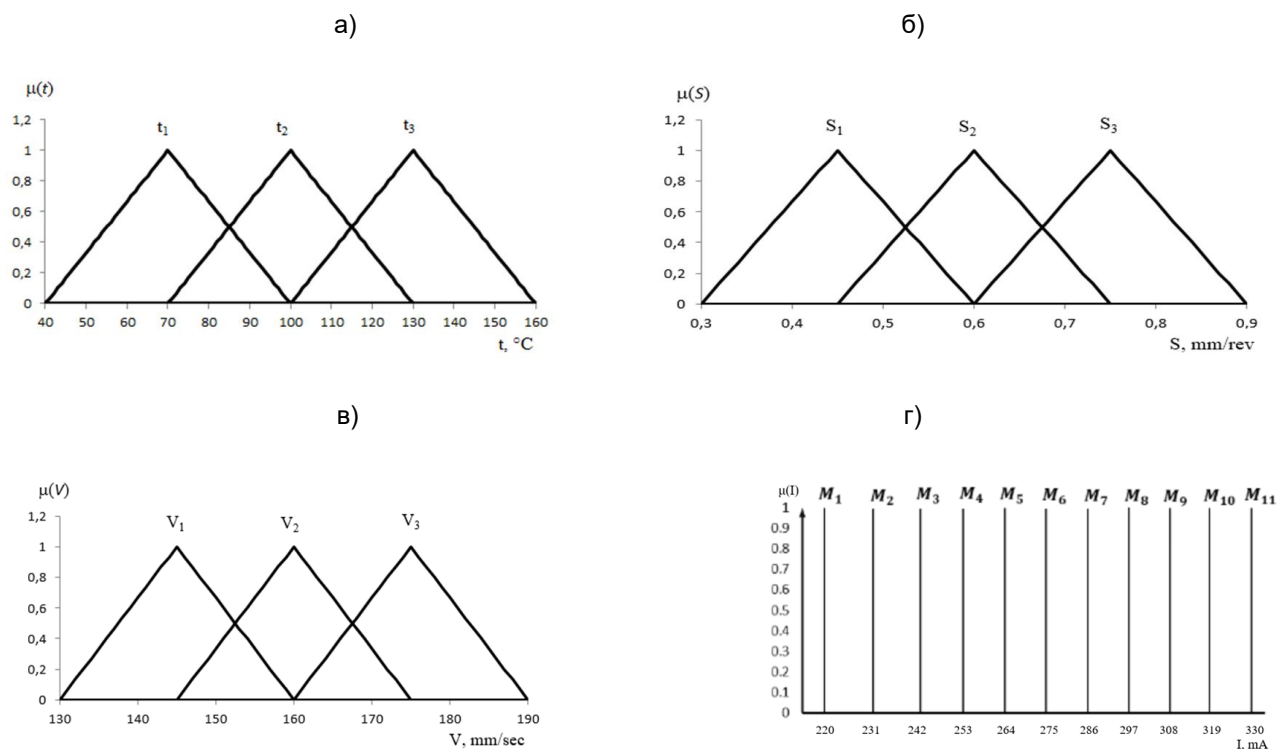


Рис. 3. Входные и выходные функции: (а) температура, (б) подача, (в) скорость резания, (г) сила тока

Fig. 3. Input and output functions: (a) temperature, (б) feed, (в) cutting speed, (г) amperage

Нечеткая математическая модель состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Вычисление степеней функции принадлежности для входных переменных с использованием формулы:

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a \vee c \leq x; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } b \leq x \leq c, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры функции принадлежности (вершины треугольника);

$x$  – четкое значение входного параметра  $t$ ,  $s$  или  $v$  на оси  $x$  (рис. 3 а, б, в).

$$N_i = \min(t_j, S_j, V_j), \quad (3)$$

где  $i=1..27, j=1..3$ .

Шаг 2. Расчет степеней истинности нечетких правил по формуле

Степень истинности определяется следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Формулы для вычисления степеней истинности нечетких правил

Table 1

Formulas for the truth degrees calculating of fuzzy rules

$N_1 = \min(t_1, S_1, V_1)$	$N_{10} = \min(t_2, S_1, V_1)$	$N_{19} = \min(t_3, S_1, V_1)$
$N_2 = \min(t_1, S_1, V_2)$	$N_{11} = \min(t_2, S_1, V_2)$	$N_{20} = \min(t_3, S_1, V_2)$
$N_3 = \min(t_1, S_1, V_3)$	$N_{12} = \min(t_2, S_1, V_3)$	$N_{21} = \min(t_3, S_1, V_3)$
$N_4 = \min(t_1, S_2, V_1)$	$N_{13} = \min(t_2, S_2, V_1)$	$N_{22} = \min(t_3, S_2, V_1)$
$N_5 = \min(t_1, S_2, V_2)$	$N_{14} = \min(t_2, S_2, V_2)$	$N_{23} = \min(t_3, S_2, V_2)$
$N_6 = \min(t_1, S_2, V_3)$	$N_{15} = \min(t_2, S_2, V_3)$	$N_{24} = \min(t_3, S_2, V_3)$
$N_7 = \min(t_1, S_3, V_1)$	$N_{16} = \min(t_2, S_3, V_1)$	$N_{25} = \min(t_3, S_3, V_1)$
$N_8 = \min(t_1, S_3, V_2)$	$N_{17} = \min(t_2, S_3, V_2)$	$N_{26} = \min(t_3, S_3, V_2)$
$N_9 = \min(t_1, S_3, V_3)$	$N_{18} = \min(t_2, S_3, V_3)$	$N_{27} = \min(t_3, S_3, V_3)$

Для того чтобы нечеткая модель имела аддитивность, необходимо использовать мягкие формулы для нахождения минимума (soft-min) по формуле

$$\text{soft} - \min(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2}, \text{ где } \delta = 0,05. \quad (4)$$

При использовании жестких операций для нахождения минимума в нечеткой системе, когда одна из переменных в формуле (3) равна нулю, выход нечеткой модели будет равен нулю. В случае использования формулы soft-min (4) выходная нечеткая модель не будет равна нулю. Это обеспечивает свойство аддитивности любой нечеткой системы.

Схема расчета мягкого минимума показана на рис. 4а.

Шаг 3. Расчет уровней заключений каждого выходного значения по формуле

$$I_k = \max(N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}), \quad (5)$$

где  $k = 1 \dots 11, i = 1 \dots 27$ .

В нашем случае степени возможности каждого выходного значения будут определяться по формулам, представленным в табл. 2.

Кроме того, для того, чтобы нечеткая модель имела аддитивность, необходимо использовать мягкие формулы для нахождения максимума (soft-max) по формуле

$$\text{soft} - \max(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2}, \quad (6)$$

где  $\delta=0,05$ .



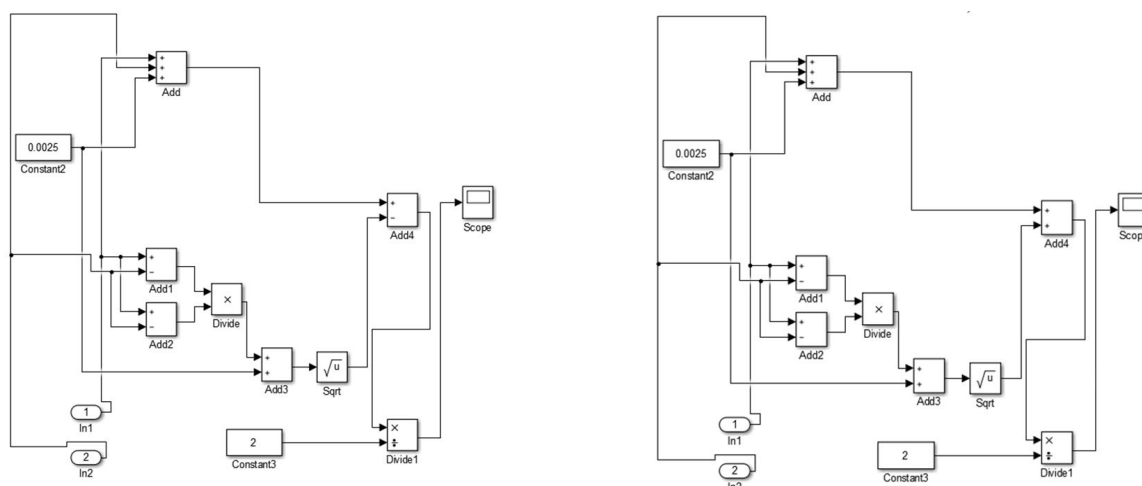


Рис. 4. Схемы мягких операторов: (а) мягкий минимум; (б) мягкий максимум

Fig. 4. Soft operator schemes: (a) soft minimum; (b) soft high

Таблица 2

Формулы для вычисления уровней заключений каждого выходного значения

Table 2

Formulas for calculating the conclusion levels of each output value

$I_1 = N_{27}$	$I_6 = \max (N_{12}; N_{14}; N_{16})$
$I_2 = \max (N_{24}; N_{26})$	$I_7 = \max (N_9; N_{11}; N_{13})$
$I_3 = \max (N_{21}; N_{23}; N_{25})$	$I_8 = \max (N_6; N_8; N_{10})$
$I_4 = \max (N_{18}; N_{20}; N_{22})$	$I_9 = \max (N_3; N_5; N_7)$
$I_5 = \max (N_{15}; N_{17}; N_{19})$	$I_{10} = \max (N_2; N_4)$
$I_{11} = N_1$	

Схема расчета мягкого максимума показана на рис. 4б.

Шаг 4. Расчет четкого значения тока, передаваемого на устройство преобразования ток-напряжение по формуле (1), производится следующим образом

$$I_f = \frac{\sum_{k=1}^{11} I_i M_i}{\sum_{k=1}^{11} I_i} = \frac{I_1 M_1 + I_2 M_2 + \dots + I_{11} M_{11}}{I_1 + I_2 + \dots + I_{11}}, \quad (7)$$

где  $M_i$  - метки одноэлементной функции принадлежности выходной переменной.

### 3. Результаты и их обсуждение

Экспериментальное параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом

Экспериментальное параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом показано на рис. 5. Нечеткая математическая модель управления термоэлементом, рассмотренная в разделе 2.3, и универсальная формула (1) для преобразования ток-напряжение, реализованы в ПЛИС Spartan 3E семейства Xilinx.



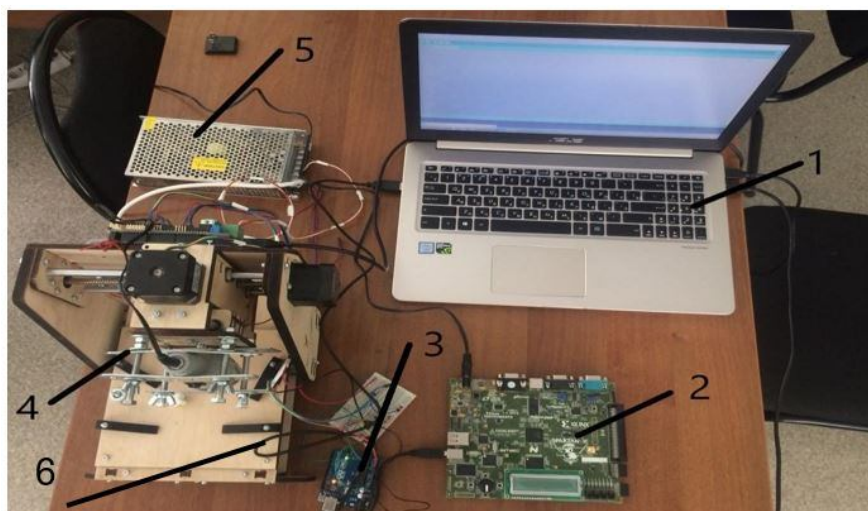


Рис. 5. Экспериментальное параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом в нечеткой системе управления охлаждением изделий: 1– ПК; 2 – ПЛИС; 3 – микроконтроллер; 4 – фрезерный станок, 5 – источник питания, 6 – термоэлемент

Fig. 5. Experimental parallel-conveyor thermoelement control device in fuzzy cooling control system of products: 1-PC; 2-FPGA; 3-microcontroller; 4-milling machine; 5-power supply; 6-thermoelement

Использование мягких операторов является отличительной особенностью нечеткой математической модели. В нашем случае, мягкие операторы используются для реализации 2 и 3 шагов в нечеткой модели в устройстве управления термоэлементом на основе генератора тока. На основе разработанной нечеткой математической модели был получен поверхностный отклик нечеткой выходной переменной с жесткими и мягкими операторами. Характеристики получены на выходе нечеткого устройства для вычисления тока, передаваемого на термоэлемент. Графическая интерпретация полученных характеристик показана на рис. 6.

Следует отметить, что при использовании жестких операторов (рис. 6а) в нечеткой модели управляющего термо-

элементом имеются зоны нечувствительности. Когда переменная скорость резания  $V$ , имеющая значение 170..190, находится в зоне нечувствительности, нечеткая выходная переменная практически не реагирует на изменение входной переменной. Таким образом, нечеткая модель не является аддитивной. Такой проблемы нет, когда используются мягкие операторы. После этого была смоделирована работа устройства, рассмотренного в разделе 3.1. Первоначально была смоделирована работа устройства, показанного на рис. 2. На вход этого устройства поступает сигнал тока  $I_f$ . Этот сигнал в устройстве для контроля термоэлемента на основе генератора тока (рис. 1а) передается из блока 1а с блоком 2.

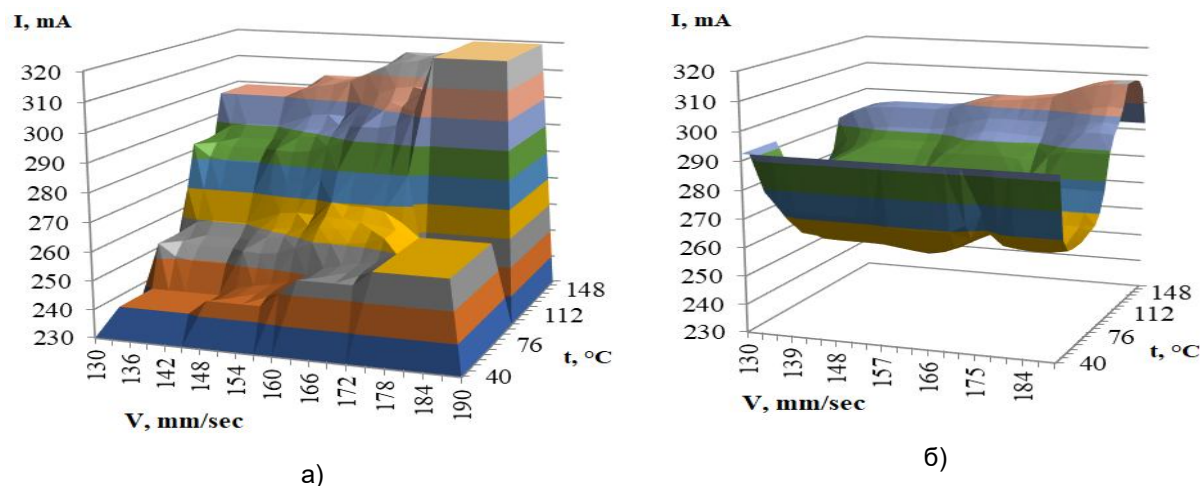


Рис. 6. Графики моделирования поверхностного отклика нечеткой выходной переменной:  
а – с использованием жестких операторов; б – с использованием мягких операторов

Fig. 6. Graphs of modeling the surface response of a fuzzy output variable:  
(a) using hard operators; (b) using soft operators

Затем, для того чтобы передать управляющий сигнал на операционный усилитель (рис.1), сигнал тока  $I_f$  должен быть преобразован в сигнал напряжения  $U_{res}$ . Операция преобразования тока в напряжение выполняется в устройстве, описанном в разделе 2.1. Работа устройства преобразования тока в

напряжение моделировалась в программе Matlab Simulink. Результат преобразования тока при значениях 230..330 мА в напряжение  $U_{res}$  0..5 В показан на рис. 7. Таким образом, преобразованный сигнал тока  $I_f$  в сигнал напряжения  $U_{res}$  в блоке 2 (см. рис. 1) передается на вход операционного усилителя.

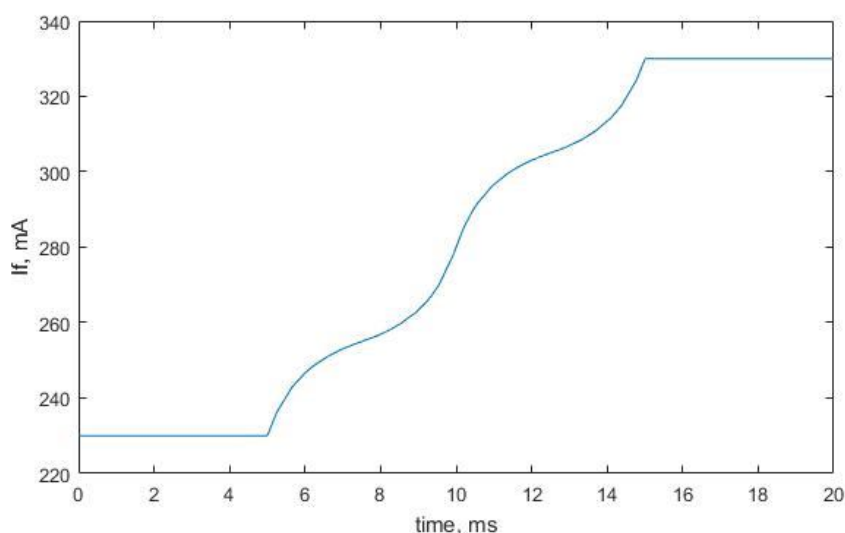


Рис. 7. Имитационное устройство для управления термоэлементом на основе генератора тока

Fig. 7. Simulation device for thermo element control based on a current generator

Временные тесты при частоте 50 МГц, выполненные в программной среде Modelsim, показали, что для вычисления величины силы тока  $I_f$  по формуле (7), подаваемого на устройство преобразования напряжения, составляет порядка 380 нс (рис. 8).

При использовании устройства преобразования напряжения временные тесты показали, что расчет напряжения  $U_{res}U_{Res}$  осуществляется за 190 нс (рис.9).

Сравнение с известными моделями предложенного устройства представлено в табл. 3.

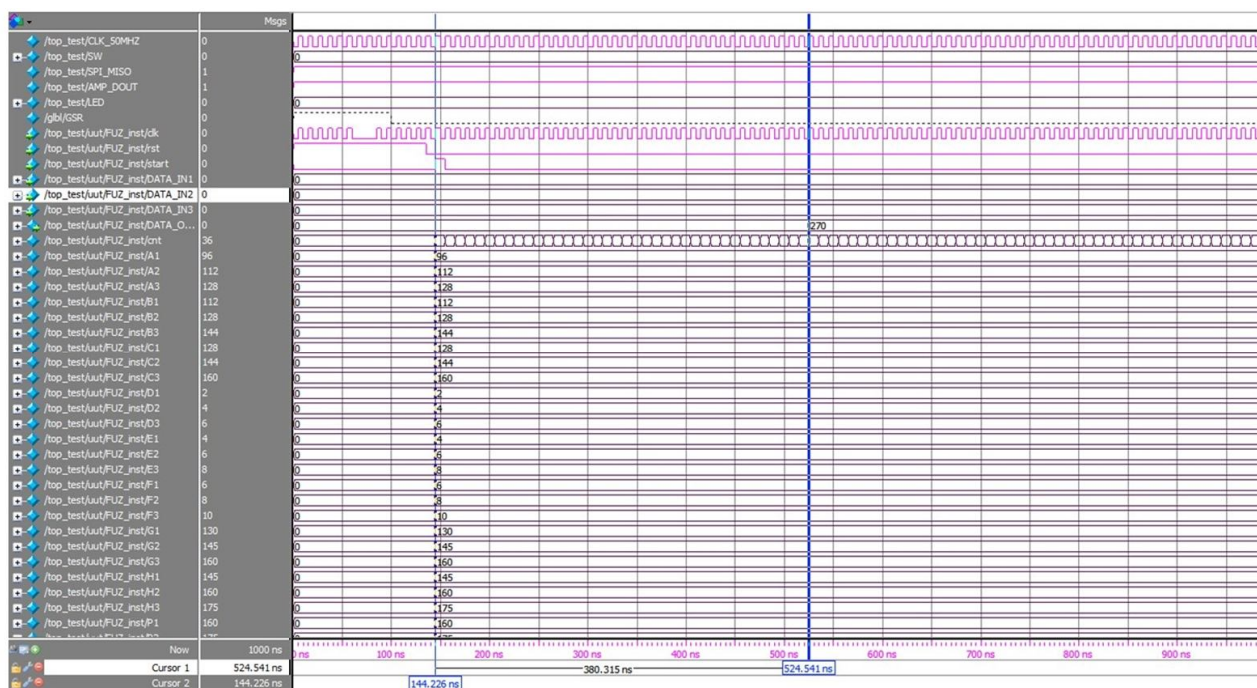


Рис.8. Диаграмма времени расчета величины  $I_f$  в устройстве преобразования напряжения

Fig.8. Time diagram of  $I_f$  value calculation in voltage conversion device

Таблица 3

Вычислительные характеристики устройств

Table 3

Computing characteristics of devices

Модель	Вычислитель, нс	Преобразователь, нс	Суммарное время, нс
[16]	—	—	5 390 070
[17]	—	—	20 000 000
[18]	—	—	10 000 000
Быстродействующий преобразователь	380	190	570

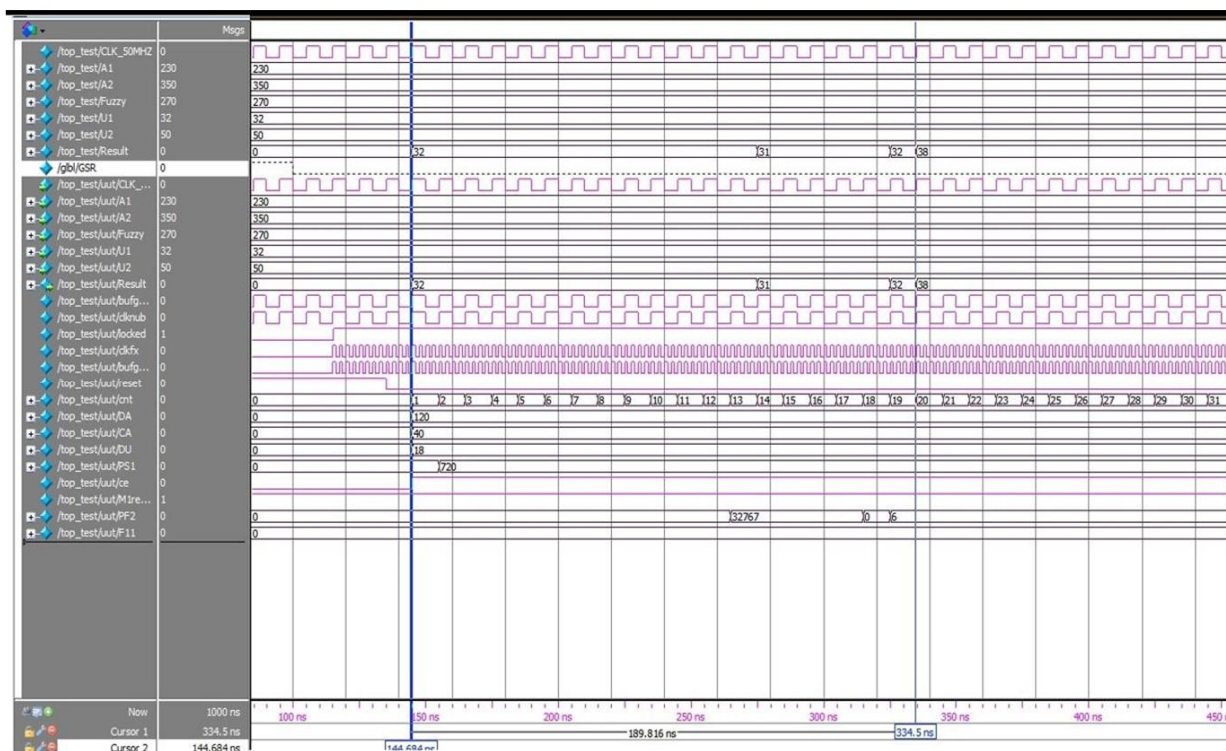


Рис.9. Диаграмма времени расчета величины  $U_{res}$  для устройства преобразования напряжения

Fig.9. Ures value calculation time diagram for voltage conversion device

Таким образом, в случае возникновения внешних воздействий, действующих при охлаждении изделий при обработке деталей на оборудовании с числовым программным управлением в режиме реального времени, за 570 нс будет принято решение о назначении новой величины силы тока.

## Выводы

В статье представлено параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом. В ходе экспериментов

было установлено, что данное устройство выдает управляющий сигнал в течение 570 нс.

В статье также представлена нечеткая математическая модель управления термоэлементом, которая вычисляет значение силы тока. Нечеткая MISO-модель состоит из трех входных и одной выходной переменной. В ходе моделирования установлено, что мягкие операторы, используемые в нечетком выводе, обеспечивают аддитивность нечеткой системы.

## Список литературы

1. Liang M., Yeap T., Hermansyah A., Rahmati S. Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. P. 1497–1508. doi:10.1016/s0890-6955(03)00166-4.



2. Mayr J. Thermal issues in machine tools // CIRP Annals Manufacturing Technology, 2012. P. 771–791. doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.008.
3. Choudhury I. A., El-Baradie M. A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review // Journal of Materials Processing Technology. 1998. P. 278-284. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00429-9.
4. Rahman M., Seah W. K. H., Teo T. T. The machinability of inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology, 1997. P. 199-204. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02624-6.
5. Баева Л.Б. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на процесс обработки металлов резанием // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей участников IX Международной научно-практической конференции. Курск, 2017. С. 32-34.
6. Лебединский К.В., Юнкин И.Я., Никишин А.В. Система подачи охлажденного ионизированного воздуха «INAIR» для охлаждения режущего инструмента // Разработка и внедрение ресурсосберегающих и импортозамещающих технологий и устройств: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Пермь, 2016. С. 80-84.
7. Кабак И.С., Суханова Н.В., Гаделев А.М. Применение нейронных сетей при диагностике состояния режущего инструмента // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2012. Т. 2, №4. С. 77-79.
8. Shrivastava Y., Singh B. Stable cutting zone prediction in CNC turning using adaptive signal processing technique merged with artificial neural network and multi-objective genetic algorithm // European Journal of Mechanics – A/Solids. 2018. P. 238–248. doi:10.1016/j.euromechsol.2018.03.009.
9. Титов В.С., Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Нечетко-логическая система управления стабилизацией процесса резания деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. №3. С. 54-58.
10. Бобырь М.В. Методы построения функций принадлежности для нечетких баз знаний // Промышленные АСУ и контроллеры, 2011. №2. С. 27-32.
11. Титенко Е.А. Высокопроизводительные вычислительные системы на основе ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета, 2012. № 4-2 (43). С. 73-77.
12. Мишин А.Б. Использование параллельно-конвейерной схемы вычислений при разработке аппаратно-ориентированного алгоритма фильтрации изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. Т. 20. №2 (65). С. 15-18.
13. 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.
14. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A Method Of Defuzzification Based On The Approach Of Areas' Ratio // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 59. P. 19-32.

15. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7 (133). С. 7-15.

16. Karakuzu C., Karakaya F., Zavgıslu M. A. FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning // Neural Networks. 2016. С. 128–140. doi:10.1016/j.neunet.2016.02.004.

17. Prathap J. A., Anandhi T.S., Sivakumaran T.S. Xilinx Spartan 3A DSP FPGA based DC Voltage Regulators for PV Systems // Materials Today: Proceedings. 2018. P. 1348–1358. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.221.

18. Karthigeyan P., Raja M. S., Kumar T. S., Ganesh S. S., Lavanya J. Simulation of Bi-directional DC-DC Converter Using FPGA // Procedia Computer Science, 2016. P. 708–714. doi:10.1016/j.procs.2016.03.093.

### References

1. Liang M., Yeap T., Hermansyah A., Rahmati S. Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, pp. 1497–1508. doi:10.1016/s0890-6955(03)00166-4.

2. Mayr J. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2012, pp. 771–791. doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.008.

3. Choudhury I.A., El-Baradie M.A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, pp. 278-284. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00429-9.

4. Rahman M., Seah W. K.H., Teo T.T. The machinability of inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, pp. 199-204. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02624-6.

5. Baeva L.B. [The Influence of cooling fluids on the process of metal cutting]. *Sbornik statei uchastnikov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: "Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii"* [Collection of articles of the IX International scientific and practical conference "Innovations in technology and education"]. Kursk, 2017, pp. 32-34 (In Russ.).

6. Lebedinsky K.V. Yunkin, I.Ya., Nikishin A.V. [The system of supply of cooled ionized air "suspended" for cooling of the cutting tool]. *Sbornik statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Razrabotka i vnedrenie resursosberegayushchikh i importozameshchayushchikh tekhnologii i ustroystv"* [Collection of articles in the VII International scientific and practical conference "Development and implementation of resource-saving and import-substituting technologies and devices"]. Perm, 2016, pp. 80-84 (In Russ.)

7. Cabak I.S., Sukhanova N.V., Gadelev A. M. Primenenie neironnykh setei pri iagnostike sostoyaniya rezhushchego instrumenta [The use of neural networks in the diagnosis of

the state of the cutting tool]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Kabardino-Balkar State University*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 77-79 (In Russ.)

8. Shrivastava Y., Singh B. Stable cutting zone prediction in CNC turning using adaptive signal processing technique merged with artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2018, pp. 238–248. doi:10.1016/j.euromechsol.2018.03.009.

9. Titov V.S., Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Nechetko-logicheskaya sistema upravleniya stabilizatsiei protsessa rezaniya detalei [Fuzzy logical control system for stabilization of the cutting process of parts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 3, pp. 54-58 (In Russ.)

10. Bobyr M.V. Metody postroeniya funktsii prinadlezhnostei dlya nechetkikh baz znaniy [Methods of constructing accessory functions for fuzzy knowledge bases]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and controllers*, 2011, no. 2, pp. 27-32 (In Russ.).

11. Titenko E.A. Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS [High-Performance computing systems based on FPGA]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2(43), pp. 73-77 (In Russ.)

12. Mishin A.B. Ispol'zovanie parallel'no-konveiernoi skhemy vychislenii pri razrabotke apparatno-orientirovannogo algoritma fil'tratsii izobrazhenii [The use of parallel-pipeline scheme of calculations in the development of hardware-oriented algorithm of image filtering]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, vol. 20, no. 2(65), pp. 15-18 (In Russ.).

13. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neuro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploschadei [Training of neuro-fuzzy system based on the area difference method]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial intelligence and decision-making*, 2016, no. 4, pp. 15-26 (In Russ.).

14. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabukhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio. *Applied soft computing*, 2017, vol. 59, pp. 19-32.

15. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Analiz ispol'zovaniya myagkikh arifmeticheskikh operatsii v strukture nechetko-logicheskogo vyvoda [Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy-logical inference]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of computer and information technologies*, 2015, no. 7 (133), pp. 7-15 (In Russ.).

16. Karakuzu C., Karakaya F., Zavuşlu M.A. FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning. *Neural Networks*, 2016, pp. 128–140. doi: 10.1016/j.neunet.2016.02.004.



17. Prathap J. A., Anandhi T.S., Sivakumaran T.S. Xilinx Spartan 3A DSP FPGA based DC Voltage Regulators for PV Systems. *Materials Today: Proceedings*, 2018, pp. 1348–1358. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.221.

18. Karthigeyan P., Raja M. S., Kumar T. S., Ganesh S. S., Lavanya J. Simulation of Bi-directional DC-DC Converter Using FPGA. *Procedia Computer Science*, 2016, pp. 708–714. doi:10.1016/j.procs.2016.03.093.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Бобырь Максим Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

**Maksim V. Bobyr**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

**Милостная Наталья Анатольевна**, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat\_mil@mail.ru

**Natalia A. Milostnaya**, Cand. of Sci. (Engineering), Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat\_mil@mail.ru

**Алтухов Дмитрий Олегович**, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dimonalt93@mail.ru

**Dmitrii O. Altukhov**, Post-Graduate Student, Department of Computer Engineering, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dimonalt93@mail.ru