

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-163-179>

Визуальное программирование метода отношения площадей

М.В. Бобырь¹ ✉, Н.И. Храпова¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Исследование зависимости между входными и выходными характеристиками нечетко-логической системы на основе применения метода отношения площадей. Для описания указанного метода и полученных во время моделирования в табличном процессоре результатов предлагается использование средств иллюстративного представления информации – визуальное программирование.

Методы. Для изучения метода отношения площадей рассматривалась нечетко-логическая модель, содержащая две входные переменные с тремя треугольными функциями принадлежности и одну выходную переменную с пятью треугольными функциями принадлежности. Была сформирована база нечетких правил. Для определения степеней активации выходных термов применялось минимаксное правило вывода Л. Заде. Дефаззификация значений проводилась с использованием модели, в основе которой лежит метод отношения площадей.

Результаты. Рассмотрены преимущества метода отношения площадей перед традиционными моделями, которые заключаются в возможности компенсировать главный недостаток – сужение интервала дефаззификации. С помощью предлагаемого метода изучена возможность использования различных количеств переменных на входных и выходных функциях принадлежности. Результаты экспериментальных исследований показали, что комбинирование параметров позволяет создать визуальное представление характеристик между входными и выходными переменными.

Заключение. В данной статье описан метод отношения площадей, который позволяет визуализировать зависимость между входными и выходными переменными. Приведены основные результаты численного моделирования, отражающие специфику исследуемого метода. Изучение проводилось посредством визуального программирования, которое обеспечивает ряд преимуществ, таких как повышение качества программного продукта, обеспечение четкой структуризации задачи и доступность для восприятия человека.

Ключевые слова: нечеткая логика; сужение интервала дефаззификации; метод отношения площадей; визуальное программирование; табличный процессор.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

Для цитирования Бобырь М.В., Храпова Н.И. Визуальное программирование метода отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 163-179. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-163-179>.

Поступила в редакцию 14.01.2024

Подписана в печать 06.02.2024

Опубликована 27.03.2024

© Бобырь М.В., Храпова Н.И., 2024

Visual Programming of the Area Ratio Method

Maksim V. Bobyr¹ ✉, Natalia I. Khrapova¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: maxboby@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Investigation of the relationship between the input and output characteristics of a fuzzy logic system based on the application of the area ratio method. The description of the specified method and the results obtained during modeling in a tabular processor is carried out using the means of illustrative presentation of information – visual programming.

Methods. To study the area ratio method, we considered a fuzzy logic model containing two input variables with three triangular membership functions and one output variable with five triangular membership functions. A database of fuzzy rules has been formed. The degrees of activation of the output terms were determined using the minimax rule of output L. Zadeh. The defuzzification of the values was carried out using a model based on the area ratio method.

Results. There are advantages of the area ratio method over traditional models, which consist in the ability to compensate for the main disadvantage - narrowing the defuzzification interval. Using the proposed method, the possibility of using different numbers of variables on the input and output membership functions is studied. The results of experimental studies have shown that combining the parameters allows us to create a visual representation of the characteristics between the input and output variables.

Conclusion. This article describes the area ratio method, which allows us to visualize the relationship between input and output variables. There are the main results of numerical modeling reflecting the specifics of the method. The study was conducted through visual programming, which provides a number of advantages, such as improving the quality of the software product, ensuring a clear structuring of the task and accessibility to human perception.

Keywords: fuzzy logic; narrowing of the defuzzification interval; area ratio method; visual programming; table processor.

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

Funding. The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00071 "Development of a computer vision model for intelligent navigation of robotic systems based on the construction of three-dimensional scenes based on depth maps".

For citation: Bobyr M. V., Khrapova N. I.. Visual Programming of the Area Ratio Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 163-179 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-163-179>.

Received 14.01.2024

Accepted 06.02.2024

Published 27.03.2024

Введение

В настоящее время значение нечеткой логики продолжает расти во всех

сферах [1-3]. Широкое распространение получили алгоритмы нечетко-логического вывода, названные в честь их создателей Tsukamoto, Sugeno, Larsen [4-7]. Важ-

нейшее место в нечеткой логике занимает также алгоритм Mamdani. В основе методики данного алгоритма лежит отображение входных сигналов в выходной, которое обеспечивает наиболее точное приближение к реальной системе.

Нечеткая модель Mamdani лежит в основе большого количества систем: в статье [8] разработана система автоматического контроля влажности природного газа, в статье [9] представлена система управления освещением парковой зоны, в статье [10] рассматривается задача подбора персонала в организациях.

Несмотря на широкое применение алгоритма Mamdani, он имеет ряд несовершенств, таких как снижение чувствительности или нечувствительность, разрывность метода дефаззификации [11]. Главным недостатком является сужение интервала дефаззификации, которое заключается в невозможности получения крайних (min или max) значений выходной переменной на выходе нечеткой модели [12,13]. Компенсировать эту погрешность позволяет использование метода отношения площадей [14-15].

Метод отношения площадей основывается на нахождении площадей треугольных или трапециевидных функций принадлежности с помощью обобщенной формулы:

$$S = \frac{h}{6} (d_1 + 4d_2 + d_3), \quad (1)$$

при h – высота рассматриваемой фигуры; d_1 , d_2 , d_3 – длины нижнего, среднего и верхнего оснований фигуры.

Для описания метода отношения площадей использовались средства визуального программирования [16]. Визуальное программирование – процесс образного описания рассматриваемого алгоритма с использованием традиционного набора графических элементов. В настоящее время роль рассматриваемого метода иллюстративного представления информации значительно возрастает, так как он имеет ряд преимуществ: совершенствование программного продукта благодаря снижению количества ошибок при разработке программы, четкое отражение структуры решаемой задачи, а также доступность восприятия человеком.

Материалы и методы

Преимуществом метода отношения площадей является возможность компенсировать ошибку при сужении интервала дефаззификации, что приводит к увеличению производительности и быстродействия любой нечеткой системы [17].

Рассмотрим представление данного метода в среде табличного процессора.

1. Формирование исходных данных.

В среде табличного процессора для входных переменных A_1 - A_3 и B_1 - B_3 и выходных переменных C_1 - C_5 задаются исходные значения термов.

Для графического отображения функций принадлежности генерируются массивы возможных значений входных и выходных переменных по формулам (2) и (3). В разделе «результаты и их обсуждение» на рис. 2 представлены

фрагменты полученных массивов во время экспериментальных расчетов. В ячейках A20:A60 приведен диапазон суппорта первой входной переменной. Ячейки B20:B60 содержат диапазон всех возможных значений функции принадлежности первой входной переменной $\mu(A_1)$. Для второй $\mu(A_2)$ и третьей $\mu(A_3)$ функций принадлежности диапазон формируется в ячейках C20:C60 и D20:D60 соответственно. В ячейках G20:I60 приведен диапазон возможных значений для функций принадлежности второй входной переменной $\mu(B_1-B_3)$. Ячейки L20:P116 содержат диапазон возможных значений для функций принадлежности выходной переменной $\mu(C_1-C_5)$ (рис.2).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & \text{если } x > a_1 \ \& \ x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & \text{если } x > a_2 \ \& \ x \leq a_3 \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

В табличном процессоре формула (2) имеет вид

$$\begin{aligned} &=ЕСЛИ(И(A20>=A\$3;A20<=B\$3); \\ &(A20-A\$3)/(B\$3-A\$3); \\ &ЕСЛИ(И(A20>B\$3;A20<C\$3); \\ &(C\$3-A20)/(C\$3-B\$3);0)), \end{aligned} \quad (3)$$

где ЕСЛИ (И) – проверка условий; \$ – абсолютная ссылка, предназначенная для закрепления адреса ячейки при переносе формулы, т.е. при автоматическом заполнении адрес ячейки не меняется.

С помощью значений входных термов и полученных массивов строятся

графики функций принадлежности [18] (рис. 3).

2. Вычисление суммарной площади выходной функции принадлежности происходит по формуле

$$S_1 = n \times \frac{d_1}{2}, \quad (4)$$

где n – количество термов выходной функции принадлежности; d_1 – длина нижнего основания, которая рассчитывается по формуле $d_1 = a_3 - a_1$, т.к. значение переменной a_1 в табличном процессоре находится в ячейке I3, а значение a_3 в ячейке K3, то формула (4) будет иметь вид (табл.1):

$$=K3-I3. \quad (5)$$

В табличном процессоре формула для определения суммарной площади выходной функции принадлежности (4) принимает вид (табл.1):

$$=N2*N3/2=(K3-I3) * N3/2. \quad (6)$$

Система СИ предполагает, что ответ задается трехзначными числами, поэтому в формуле (6) реализована функция округления до 2 знака:

$$=ОКРУГЛ(N2*N3/2;2). \quad (7)$$

3. Расчет степеней принадлежности для входных термов происходит с помощью заданных значений для входных переменных, по которым далее производится поиск в массивах возможных состояний $\mu(A_1-A_3)$ и $\mu(B_1-B_3)$. Числовые значения, соответствующие искомым переменным a_1-a_3 и b_1-b_3 , автоматически заносятся в таблицу (рис. 5).

Формула для расчета принимает следующий вид:

$$=ОКРУГЛ(ВПР(Q2;\$A\$20:\$D\$60;2;0);3), (8)$$

где ВПР – функция для поиска данных в выбранном диапазоне; Q2 – искомое значение; A\$20:D\$60 – диапазон поиска; 2 – столбец в диапазоне, в котором необходимо провести поиск.

4. Определение степеней активации выходных термов с использованием минимаксного правила вывода Заде [19] осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} \mu(C_1) &= \min(a_1; b_1); \\ \mu(C_2) &= \max(\min(a_1; b_2); \min(a_2; b_1)); \\ \mu(C_3) &= \max(\min(a_1; b_3); \min(a_2; b_2); \min(a_3; b_1)); \\ \mu(C_4) &= \max(\min(a_2; b_3); \min(a_3; b_2)); \\ \mu(C_5) &= \min(a_3; b_3). \end{aligned} \quad (9)$$

Данные формулы (9) в табличном процессоре принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} &=МИН(Q3;S3); \\ &=МАКС(МИН(Q3;S4);МИН(Q4;S3)); \\ &=МАКС(МИН(Q3;S5);МИН(Q4;S4); \\ &МИН(Q5;S3)); \\ &=МАКС(МИН(Q4;S5);МИН(Q5;S4)); \\ &=МИН(Q5;S5). \end{aligned} \quad (10)$$

5. Присвоение числовых значений переменным высот степеней принадлежности выходных термов осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} h_1 &:= \mu(C_1); h_2 := \mu(C_2); h_3 := \mu(C_3); \\ h_4 &:= \mu(C_4); h_5 := \mu(C_5). \end{aligned} \quad (11)$$

Далее происходит построение массива возможных значений для функций принадлежности после агрегации (рис. 8). Данный массив имеет диапазон суппорта выходной переменной от 0 до 96. Заполнение ячеек массива происходит по формуле

$$=МИН(L20;\$AI\$3), \quad (12)$$

где первое значение в скобках соответствует аналогичной ячейке из массива возможных значений выходной функции принадлежности до агрегации, а второе значение соответствует величинам степеней активации выходных термов $\mu(C_1)$ - $\mu(C_5)$.

Длины верхних оснований определяются с помощью построенного массива в табличном процессоре по формуле

$$=ЕСЛИ(AI3=0;0; СЧЁТЕСЛИ(S20:S116;AI3)), \quad (13)$$

где ЕСЛИ – функция для логического сравнения значений и ожидаемых результатов; СЧЁТЕСЛИ – функция для подсчета количества ячеек, отвечающих определенному условию; AI3 – ячейка с результатом вычисления высот степеней принадлежности; S20:S116 – диапазон ячеек массива.

При значениях ячеек h_1 - h_5 равных «0», длина верхнего основания также приравнивается нулю. Если значение ячейки h_1 - h_5 отлично от нуля, то в массиве происходит подсчет количества ячеек с этим значением.

6. Расчет площадей преобразованных функций принадлежности выходной переменной происходит по формуле (табл.1)

$$S_n = \begin{cases} S_n = 0, & h = 0 \\ S_n = \frac{d_1}{2}, & h = 1 \\ S_n = \frac{h}{2}(d_1 + d_3), & h \in (0;1). \end{cases} \quad (14)$$

Формула (14) в табличном процессоре имеет вид

$$=ОКРУГЛ(AN6*(AN2-AN4)/2;2). \quad (15)$$

7. Вычисление суммы площадей преобразованных функций принадлежности происходит по формуле (табл.1)

$$S_{общ} = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (16)$$

Приведенная выше формула (16) в табличном процессоре принимает вид

$$=СУММ(AN8:AR8), \quad (17)$$

где СУММ – функция для суммирования значений, находящихся в диапазоне ячеек.

8. Расчет отношения суммы площадей преобразованных функций принадлежности к площади усеченных функ-

ций принадлежности происходит по формуле (табл.1)

$$D = \frac{S_{общ}}{S_1}. \quad (18)$$

В табличном процессоре формула (18) принимает следующий вид

$$=ОКРУГЛ(AT8/N1;2). \quad (19)$$

9. Дефаззификация полученного значения происходит по формуле

$$y_{defuz} = \left[D * (e_3 - a_1) \right] + a_1. \quad (20)$$

В табличном процессоре формула (20) имеет вид

$$=(AV2*(K15-I3))+I3. \quad (21)$$

Основные формулы, используемые в методе отношения площадей, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные формулы

Table 1. The basic formulas

Формула MAP / MAR Formula	Табличный процессор / Table Processor		Скрин / Screen
	Ячейка с ответом / The cell with the answer	Формула / Formula	
$S_1 = n \frac{d_1}{2}$	N1	= N2*N3/2=(C3-A3) * N3/2	Рис.4
d_1	N2	=C3-A3	
$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & \text{если } x > a_1 \text{ \& } x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & \text{если } x > a_2 \text{ \& } x \leq a_3 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$	B20:B60	=ЕСЛИ(И(A20>=\$A\$3;A20<=\$B\$3);(A20-\$A\$3)/(\$B\$3-\$A\$3);ЕСЛИ(И(A20>\$B\$3;A20<\$C\$3);(\$C\$3-A20)/(\$C\$3-\$B\$3);0))	Рис.2
a_1-a_3	Q3:Q5	=ВПР(Q2;\$A\$20:\$D\$60;2;0)	Рис.5
b_1-b_3	S3:S5	= ВПР(S2;\$F\$20:\$I\$60;2;0)	
d_1	AN2:AR2	= \$K\$3-\$I\$3	Рис.10
$d_{31}-d_{35}$	AN4	=ЕСЛИ(AI3=0;0;СЧЁТЕСЛИ(S20:S116;AI3))	

Формула MAP / MAR Formula	Табличный процессор / Table Processor		Скрин / Screen
	Ячейка с ответом / The cell with the answer	Формула / Formula	
h_1	AN6	:=AL3	Рис.11
$S_n = \begin{cases} S_n = 0, & h = 0 \\ S_n = \frac{d_1}{2}, & h = 1 \\ S_n = \frac{h}{2}(d_1 + d_3), & h \in (0;1) \end{cases}$	AN8:AR8	=AN6*(AN2-AN4)/2	
$S_{общ} = \sum_{i=1}^n S_i$	AT8	=СУММ(AN8:AR8)	
$D = \frac{S_{общ}}{S_1}$	AV2	=AT8/N1	
$y_{defuz} = [D*(e_3 - a_1)] + a_1$	AV5	=(AV2*(K15-I3))+I3	

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим численный пример описания метода отношения площадей.

1. Формирование исходных данных.

В среде табличного процессора были заданы исходные значения термов для

входных переменных A₁-A₃ и B₁-B₃. Предположим, что для A₁-A₃ термы принимают следующие значения: a₁=15, a₂=25, a₃=35, b₁=25, b₂=35, b₃=45, c₁=35, c₂=45, c₃=55. Для B₁-B₃: a₁=15, a₂=25, a₃=35, b₁=25, b₂=35, b₃=45, c₁=35, c₂=45, c₃=55 (рис.1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1		A1				B1				C1		
2	a ₁	a ₂	a ₃		a ₁	a ₂	a ₃		a ₁	a ₂	a ₃	
3	15	25	35		15	25	35		0	16	32	
4		A2				B2				C2		
5	b ₁	b ₂	b ₃		b ₁	b ₂	b ₃		b ₁	b ₂	b ₃	
6	25	35	45		25	35	45		16	32	48	
7		A3				B3				C3		
8	c ₁	c ₂	c ₃		c ₁	c ₂	c ₃		c ₁	c ₂	c ₃	
9	35	45	55		35	45	55		32	48	64	
10										C4		
11									d ₁	d ₂	d ₃	
12									48	64	80	
13										C5		
14									e ₁	e ₂	e ₃	
15									64	80	96	

Рис. 1. Исходные значения термов для входных переменных A₁-A₃ и B₁-B₃ и выходных переменных C₁-C₅

Fig. 1. The initial term values for input variables A₁-A₃ and B₁-B₃ and output variables C₁-C₅

Присвоим исходные значения термов для выходных переменных C_1-C_5 . Пусть $a_1=0, a_2=16, a_3=32, b_1=16, b_2=32, b_3=48, c_1=32, c_2=48, c_3=64, d_1=48, d_2=64, d_3=80, e_1=64, e_2=80, e_3=96$ (см. рис.1).

Для построения графиков функций принадлежности сформируем массив возможных значений входных переменных $\mu(A_1-A_3)$ и $\mu(B_1-B_3)$ и выходных $\mu(C_1-C_5)$ по формуле (3). Для входных переменных данный массив имеет диапазон суппорта от 15 до 55, для выходных – от 0 до 96 (рис. 2).

Полученные во время экспериментальных исследований графики функций принадлежности изображены на рис. 3.

2. Для вычисления суммарной площади выходной функции принадлежности

определим некоторые значения переменных. Количество термов выходной функции принадлежности $n=5$. Длина нижнего основания (формула (5)) принимает значение $d1 = a3 - a1=32-0=32$. Следовательно, площадь рассчитываемой функции принадлежности (формула (7)) равна $S1=(K3-I3) * N3/2=(32-0)*5/2=80$ (рис.4).

3. Расчет степеней принадлежности для входных термов (формула (8)). В качестве примера входные переменные принимают следующие значения: $A=26, B=41$. В массивах возможных состояний $\mu(A_1-A_3)$ и $\mu(B_1-B_3)$ (см. рис.2) происходит поиск введенных значений «26» и «41» соответственно. Вследствие поиска были получены данные: $a_1=0,9; a_2=0,1; a_3=0; b_1=0; b_2=0,4; b_3=0,6$ (рис.5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
19		$\mu(A_1)$	$\mu(A_2)$	$\mu(A_3)$			$\mu(B_1)$	$\mu(B_2)$	$\mu(B_3)$			$\mu(C_1)$	$\mu(C_2)$	$\mu(C_3)$	$\mu(C_4)$	$\mu(C_5)$
20	15	0	0	0		15	0	0	0		0	0	0	0	0	0
21	16	0,1	0	0		16	0,1	0	0		1	0,0625	0	0	0	0
22	17	0,2	0	0		17	0,2	0	0		2	0,125	0	0	0	0
23	18	0,3	0	0		18	0,3	0	0		3	0,1875	0	0	0	0
24	19	0,4	0	0		19	0,4	0	0		4	0,25	0	0	0	0
25	20	0,5	0	0		20	0,5	0	0		5	0,3125	0	0	0	0
26	21	0,6	0	0		21	0,6	0	0		6	0,375	0	0	0	0
27	22	0,7	0	0		22	0,7	0	0		7	0,4375	0	0	0	0
28	23	0,8	0	0		23	0,8	0	0		8	0,5	0	0	0	0
29	24	0,9	0	0		24	0,9	0	0		9	0,5625	0	0	0	0
30	25	1	0	0		25	1	0	0		10	0,625	0	0	0	0
31	26	0,9	0,1	0		26	0,9	0,1	0		11	0,6875	0	0	0	0
32	27	0,8	0,2	0		27	0,8	0,2	0		12	0,75	0	0	0	0
33	28	0,7	0,3	0		28	0,7	0,3	0		13	0,8125	0	0	0	0
34	29	0,6	0,4	0		29	0,6	0,4	0		14	0,875	0	0	0	0
35	30	0,5	0,5	0		30	0,5	0,5	0		15	0,9375	0	0	0	0
36	31	0,4	0,6	0		31	0,4	0,6	0		16	1	0	0	0	0
37	32	0,3	0,7	0		32	0,3	0,7	0		17	0,9375	0,0625	0	0	0
38	33	0,2	0,8	0		33	0,2	0,8	0		18	0,875	0,125	0	0	0
39	34	0,1	0,9	0		34	0,1	0,9	0		19	0,8125	0,1875	0	0	0
40	35	0	1	0		35	0	1	0		20	0,75	0,25	0	0	0

Рис. 2. Фрагмент массивов возможных значений входных переменных A_1-A_3 и B_1-B_3 и выходных переменных C_1-C_5

Fig. 2. The fragment of possible values' arrays of input variables A_1-A_3 and B_1-B_3 and output variables C_1-C_5

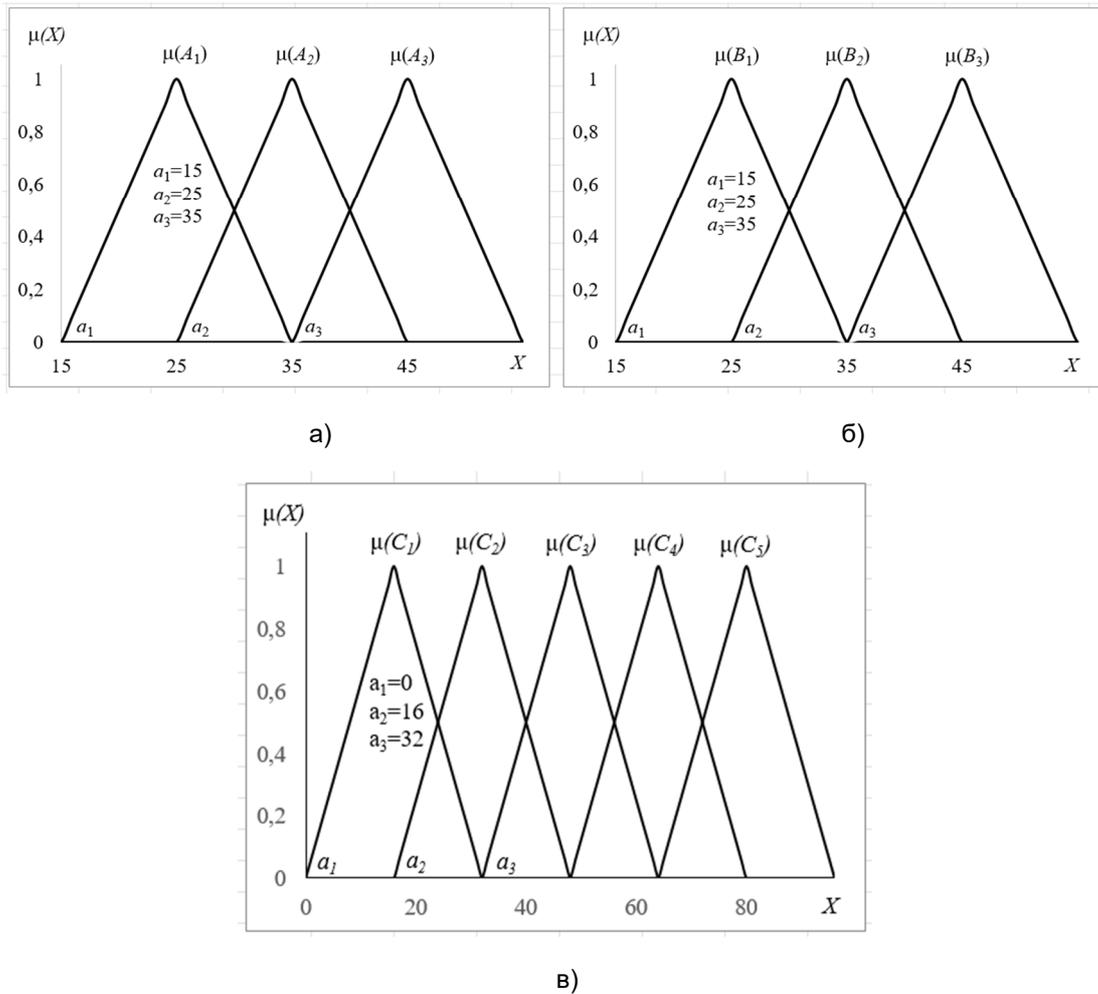


Рис. 3. Графики функций принадлежности: **а** – для переменных A_1 - A_3 ; **б** – для переменных B_1 - B_3 ; **в** – для переменных C_1 - C_5

Fig. 3. The graphs of membership functions: **a** – for variables A_1 - A_3 ; **б** – for variables B_1 - B_3 ; **в** – for variables C_1 - C_5

	M	N
1	S_1	80
2	d_1	32
3	n	5

Рис. 4. Вычисление суммарной площади выходной функции принадлежности в табличном процессоре

Fig. 4. The calculation of the total area of the output membership function in a tabular processor

	P	Q	R	S
1		A		B
2		26		41
3	a_1	0,9	b_1	0
4	a_2	0,1	b_2	0,4
5	a_3	0	b_3	0,6

Рис. 5. Расчет степеней принадлежности для входных термов

Fig. 5. The calculation of membership degrees for the input terms

4. Определение степеней активации выходных термов (формула (10)) про-

исходит с использованием минимаксного правила вывода Заде (рис.6):

$$\begin{aligned} \mu(C_1) &= \text{МИН}(Q3; S3) = \text{МИН}(0,9; 0) = 0; \\ \mu(C_2) &= \text{МАКС}(\text{МИН}(Q3; S4); \text{МИН}(Q4; S3)) = \\ &= \text{МАКС}(\text{МИН}(0,9; 0,4); \text{МИН}(0,9; 0)) = 0,4; \\ \mu(C_3) &= \text{МАКС}(\text{МИН}(Q3; S5); \text{МИН}(Q4; S4); \text{МИН}(Q5; S3)) = \\ &= \text{МАКС}(\text{МИН}(0,9; 0,6); \text{МИН}(0,1; 0,4); \text{МИН}(0; 0)) = 0,6; \\ \mu(C_4) &= \text{МАКС}(\text{МИН}(Q4; S5); \text{МИН}(Q5; S4)) = \\ &= \text{МАКС}(\text{МИН}(0,1; 0,6); \text{МИН}(0; 0,4)) = 0,1; \\ \mu(C_5) &= \text{МИН}(Q5; S5) = \text{МИН}(0; 0,6) = 0. \end{aligned}$$

	АН	AI
1		
2		
3	$\mu(C_1) = \min(a_1; b_1)$	0
4	$\mu(C_2) = \max(\min(a_1; b_2); \min(a_2; b_1))$	0,4
5	$\mu(C_3) = \max(\min(a_1; b_3); \min(a_2; b_2); \min(a_3; b_1))$	0,6
6	$\mu(C_4) = \max(\min(a_2; b_3); \min(a_3; b_2))$	0,1
7	$\mu(C_5) = \min(a_3; b_3)$	0

Рис. 6. Определение степеней активации выходных термов

Fig. 6. The determination of the activation status of the output terms

5. Числовым значениям переменных высот степеней принадлежности присваиваются значения степеней принадлежности выходных термов (формула (11)): $h_1 := \mu(C_1) = 0$; $h_2 := \mu(C_2) = 0,4$; $h_3 := \mu(C_3) = 0,6$; $h_4 := \mu(C_4) = 0,1$; $h_5 := \mu(C_5) = 0$ (рис.7).

	AK	AL
3	$h_1 = \mu(C_1)$	0
4	$h_2 = \mu(C_2)$	0,4
5	$h_3 = \mu(C_3)$	0,6
6	$h_4 = \mu(C_4)$	0,1
7	$h_5 = \mu(C_5)$	0

Рис. 7. Результат присвоения числовых значений переменным h_1 - h_5

Fig. 7. The result of assigning the numeric values to variables h_1 - h_5

6. Далее происходит построение массива значений усеченных функций принадлежности по формуле (12) (рис.8). По полученному массиву был создан график преобразованных выходных функций принадлежности (рис.9). Длина нижнего основания функций принадлежности, рассчитанная выше, равна $d_1 = 32$, а длины верхних оснований, определяющиеся с помощью массива (формула (13)), равны $d_{31} = 0$; $d_{32} = 19$; $d_{33} = 13$; $d_{34} = 29$; $d_{35} = 0$.

На рис. 9 представлен график выходных функций принадлежности после агрегации.

	R	S	T	U	V	W
19		$\mu(C_1)$	$\mu(C_2)$	$\mu(C_3)$	$\mu(C_4)$	$\mu(C_5)$
20	0	0	0	0	0	0
21	1	0	0	0	0	0
22	2	0	0	0	0	0
23	3	0	0	0	0	0
24	4	0	0	0	0	0
25	5	0	0	0	0	0
26	6	0	0	0	0	0
27	7	0	0	0	0	0
28	8	0	0	0	0	0
29	9	0	0	0	0	0
30	10	0	0	0	0	0
31	11	0	0	0	0	0
32	12	0	0	0	0	0
33	13	0	0	0	0	0
34	14	0	0	0	0	0
35	15	0	0	0	0	0
36	16	0	0	0	0	0
37	17	0	0,0625	0	0	0
38	18	0	0,125	0	0	0
39	19	0	0,1875	0	0	0
40	20	0	0,25	0	0	0
41	21	0	0,3125	0	0	0
42	22	0	0,375	0	0	0
43	23	0	0,4	0	0	0
44	24	0	0,4	0	0	0
45	25	0	0,4	0	0	0
46	26	0	0,4	0	0	0
47	27	0	0,4	0	0	0

Рис. 8. Фрагмент массива значений выходных переменных после агрегации

Fig. 8. The fragment of the array values of the output variables after aggregation

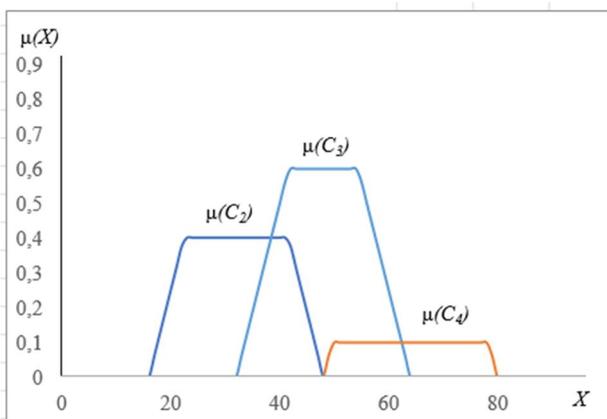


Рис. 9. Агрегация выходных функций принадлежности

Fig. 9. The aggregation of the output membership functions

Расчет площадей преобразованных функций принадлежности выходной переменной происходит по формулам (15):

$$S_{21} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АН}6 * (\text{АН}2 - \text{АН}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0 * (32 - 0) / 2; 2) = 0;$$

$$S_{22} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АО}6 * (\text{АО}2 - \text{АО}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0,4 * (32 - 19) / 2; 2) = 2,6;$$

$$S_{23} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АР}6 * (\text{АР}2 - \text{АР}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0,6 * (32 - 13) / 2; 2) = 5,7;$$

$$S_{24} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АQ}6 * (\text{АQ}2 - \text{АQ}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0,1 * (32 - 29) / 2; 2) = 0,15;$$

$$S_{25} = \text{ОКРУГЛ}(\text{AR}6 * (\text{AR}2 - \text{AR}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0 * (32 - 0) / 2; 2) = 0.$$

7. Расчет суммы всех полученных площадей (формула (17)) дал следующий результат $S_{\text{общ}} = \text{СУММ}(\text{АН}8 : \text{АР}8) = 0 + 2,6 + 5,7 + 0,15 + 0 = 8,45$.

На рис. 10 представлены результаты расчета пунктов 6 и 7 в табличном процессоре.

8. Определение отношения общей площади фигуры к площади фигуры с усеченными функциями принадлежности (формула (19)): $D = \text{ОКРУГЛ}(\text{AT}8 / \text{N}1; 2) = \text{ОКРУГЛ}(80 / 8,45; 2) = 0,11$.

9. Дефазификация выходной переменной (формула (21)):

$$y_{\text{defuz}} = (\text{AV}2 * (\text{K}15 - \text{I}3)) + \text{I}3 =$$

$$= (0,11 * (96 - 0)) + 0 = 10,56.$$

На рис. 11 представлены результаты расчета пунктов 8 и 9 в табличном процессоре.

На рис. 12 представлена результирующая диаграмма метода отношения площадей.

	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT
1	d_1						
2	32	32	32	32	32		
3	d_3						
4	0	19	13	29	0		
5	h						
6	0	0,4	0,6	0,1	0		
7	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}		$S_{общ}$
8	0	2,6	5,7	0,15	0		8,45

Рис. 10. Результаты вычисления значений S_1 - S_5 и $S_{общ}$

Fig. 10. The results of calculating values S_1 - S_5 and $S_{общ}$

	AV
1	D
2	0,11
3	
4	y_{defuz}
5	10,56

Рис. 11. Результаты вычисления значений D и y_{defuz}

Fig. 11. The results of calculating values D and y_{defuz}



Рис. 12. Результирующая диаграмма метода отношения площадей

Fig. 12. The resulting diagram of the area ratio method

Полученная поверхность, изображенная на рис. 12, отображает зависимость между входными и выходными характеристиками нечетко-логической системы при применении метода отношения площадей. Из этого следует, что поставленная цель исследования достигнута.

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа быстродействия существующих дефаззификаторов¹.

Сравнительный анализ показал, что предложенный метод отношения площадей при реализации на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) имеет лучшее быстродействие по сравнению с существующими аналогами.

¹ Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечётких систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

Таблица 2. Сравнительный анализ быстродействия дефаззификаторов**Table 2.** The comparative analysis of the defuzzifiers' performance

Дефаззификатор / Defuzzifier	Время вычисления / Calculation time	
	50, МГц	200, МГц
Оптоэлектронный дефаззификатор (патент РФ №2408052)	10^{-5} - 10^{-6} , с	
Оптоэлектронный дефаззификатор (патент РФ №2439651)	10^{-5} - 10^{-6} , с	
Дефаззификатор на основе линейного метода отношения площадей (патент РФ №2701841)	590 нс	147,5 нс

Выводы

В представленной статье рассмотрен метод отношения площадей, который позволяет визуализировать зависимость между входными и выходными переменными. Предложенный метод позволяет компенсировать ошибку при сужении интервала дефаззификации, что приводит к увеличению производительности и быстродействия нечёткой

системы. Моделирование метода отношения площадей проводилось в среде табличного процессора посредством визуального программирования. Подобное представление информации обеспечивает ряд преимуществ, таких как повышение качества программного продукта, обеспечение четкой структуризации задачи и доступность для восприятия человека.

Список литературы

1. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 88. P. 106030.
2. Бобырь М.В., Храпова Н.И., Ламонов М.А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021;25(4):162-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>
3. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // *Measurement*. 2020. Vol. 152. P. 107378.
4. Adriyendi. Fuzzy Logic using Tsukamoto Model and Sugeno Model on Prediction Cost // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018. Vol. 10. No. 6. P. 13-21.
5. Сравнение алгоритмов MAMDANI и SUGENO в задаче процесса обучения ANFIS для оценки QOE доступа к интернет-услугам на базе пакета MATLAB / В. А. Гал-

кин, С. Н. Красильников, В. Б. Попенков, Х. К. Гонсалес-Гусев // Динамика сложных систем - XXI век. 2019. Т. 13, № 2. С. 28-33.

6. Wahyuni I., Mahmudy W. F. Rainfall prediction in Tengger, Indonesia using hybrid tsukamoto FIS and genetic algorithm method // Journal of ICT Research and Applications. 2017. Vol. 11, No. 1. P. 38-55.

7. Veshneva I., Bolshakov A., Kulik A. Increasing the safety of flights with the use of mathematical model based on status functions // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 199. P. 608-621.

8. Даев Ж. А., Султанов Н. З. Система автоматического контроля влажности природного газа на основе нечеткой модели Мамдани // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 10. С. 22-25.

9. Сабитов Р. М. Энергоэффективная система управления освещением парковой зоны // Шаг в науку. 2020. № 4. С. 47-52.

10. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для отбора игроков в футбольный клуб на предсезонных сборах / С. Т. Дусакаева, И. А. Хохлов, П. Л. Нирян, М. П. Носарев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4(76). С. 228-237.

11. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. А.Г. Подвесовского, Ю.В. Тюленцева. 2-е изд. М.: BINOM. Лаборатория знаний, 2013. 798 p.

12. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Математическая модель для нового метода дефаззификации в структуре нечеткого вывода // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. № 2. С. 218-220.

13. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. №9. С.32– 41.

14. Милостная Н. А. Быстродействующие дефаззификаторы, основанные на методе отношения площадей // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 11. С. 18-25.

15. Милостная Н.А. Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021;25(3):70-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.

16. Коварцев А.Н., Жидченко В.В., Попова-Коварцева Д.А. Методы и технологии визуального программирования. Самара: ООО «Офорт», 2017. С. 197.

17. Милостная Н.А. Компенсация ошибки сужения интервала дефаззификации методом отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023;13(1):111-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-111-122>.

18. Каид В. А. А. Методы построения функций принадлежности нечетких множеств // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2(139). С. 144-153.

19. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, vol. SMC-3, p. 28-44.

20. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетно-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. №5. С. 18-23.

References

1. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, 106030 p.

2. Bobyr M.V., Khrapova N.I., Lamonov M.A. Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(4): 162-174. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>

3. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*, 2020, vol. 152, p. 107378.

4. Adriyendi. Fuzzy Logic using Tsukamoto Model and Sugeno Model on Prediction Cost. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 13-21.

5. Galkin V. A., Krasilnikov S. N., Popenkov V. B., Gonzalez-Gusev H. K. Sravnenie algoritmov MAMDANI i SUGENO v zadache protsessa obucheniya ANFIS dlya otsenki QOE dostupa k internet-uslugam na baze paketa MATLAB [Comparison of MAMDANI and SUGENO algorithms in the task of the ANFIS learning process for evaluating QOE access to Internet services based on the MATLAB package]. *Dinamika slozhnykh sistem - XXI vek = Dynamics of complex systems - XXI century*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 28-33.

6. Wahyuni I., Mahmudy W. F. Rainfall prediction in Tengger, Indonesia using hybrid tsukamoto FIS and genetic algorithm method. *Journal of ICT Research and Applications*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 38-55.

7. Veshneva I., Bolshakov A., Kulik A. Increasing the safety of flights with the use of mathematical model based on status functions. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, vol. 199, pp. 608-621.

8. Dayev J. A., Sultanov N. Z. Sistema avtomaticheskogo kontrolya vlazhnosti prirodnogo gaza na osnove nechetkoi modeli Mamdani [The system of automatic control of natural gas humidity based on the fuzzy Mamdani model]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*, 2018, no. 10, pp. 22-25.

9. Sabitov R. M. Energoeffektivnaya sistema upravleniya osveshcheniem parkovoi zony [Energy-efficient lighting control system of the park zone]. *Shag v nauku = Step into science*, 2020, no. 4, pp. 47-52.

10. Dusakaeva S. T., Khokhlov I. A., Niryan P. L., Nosarev M. P. Primenenie algoritma nechetkoi logiki Mamdani dlya otbora igrokov v futbol'nyi klub na predsezonnnykh sborakh [Application of the Mamdani fuzzy logic algorithm for the selection of players to a football club at pre-season training camps]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2022, no. 4(76), pp. 228-237.

11. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow, BINOM Publ., 2013, 798 p.

12. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Matematicheskaya model' dlya novogo metoda defazzifikatsii v strukture nechetkogo vyvoda [Mathematical model for a new method of defuzzification in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika = Mechatronics, automation and robotics*, 2018, no. 2, pp. 218-220.

13. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei [Defuzzification of inference from the base of fuzzy rules based on the area difference method]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no.9, pp.32-41.

14. Milostnaya N. A. Bystrodeistvuyushchie defazzifikatory, osnovannye na metode otnosheniya ploshchadei [High-speed defuzzifiers based on the area ratio method]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial automated control systems and controllers*, 2021, no. 11, pp. 18-25.

15. Milostnaya N.A. Stability Study of a Neuro-Fuzzy Output System Based on Ratio Area Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(3):70-85 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.

16. Kovartsev A.N., Zhidchenko V.V., Popova-Kovartseva D.A. *Metody i tekhnologii vizual'nogo programmirovaniya* [Methods and technologies of visual programming]. Samara, 2017, p. 197.

17. Milostnaya N.A. Compensation for the Error of Narrowing the Defuzzification Range by the Areas' Ratio Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023;13(1):111-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-111-122>

18. Kait V. A. A. Metody postroeniya funktsii prinadlezhnosti nechetkikh mnozhestv [Methods of constructing membership functions of fuzzy sets]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences*, 2013, no. 2(139), pp. 144-153.

19. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, vol. SMC-3, pp. 28-44.

20. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Adaptivnyi mul'tisetevoyts algoritm nechetno-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravlenie oborudovaniem s ChPU [Adaptive multi-network algorithm for fuzzy logic inference in the tasks of controlling CNC equipment]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*, 2013, no. 5, pp. 18-23.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Maxim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Храпова Наталия Игоревна, аспирант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>

Natalia I. Khrapova, Post-Graduate Student of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>