

Компенсация ошибки сужения интервала дефаззификации методом отношения площадей

Н. А. Милостная¹ ✉

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

✉ e-mail: nat_mil@mail.ru

Резюме

Цель исследования – изучение гипотезы о возможности использования метода отношения площадей для компенсации ошибки сужения интервала дефаззификации, свойственной традиционным моделям, таким как центр тяжести сумм, модели высот, первого максимума, среднего максимума и последнего максимума.

Методы. Для анализа свойств метода отношения площадей использовалась нечёткая модель, состоящая из двух входных переменных и одной выходной. При этом входные переменные имели по две треугольных функций принадлежности, выходная переменная – три треугольных функций принадлежности. База знаний состояла из четырёх нечетких правил. В качестве модели импликации использовалось композиционное правило Заде. В процессе дефаззификации использовались две модели классического центра тяжести и модель, основанная на методе отношения площадей.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что предложенный дефаззификатор, основанный на методе отношения площадей, компенсирует ошибку сужения интервала дефаззификации. Также в ходе экспериментальных исследований было установлено, что при использовании модели центра тяжести на выходе формируется результирующая поверхность, которая только на 50% пересекается с суппортом выходной переменной, что и формирует ошибку сужения интервала дефаззификации. При использовании метода отношения площадей результирующая поверхность на 100% пересекается с суппортом выходной переменной, что позволяет сделать вывод о том, что при использовании метода отношения площадей исключается ошибка, связанная с сужением интервала дефаззификации.

Заключение. В статье представлена нечёткая MISO-модель, использующая для анализа свойств метода отношения площадей. Отличительной особенностью предлагаемой модели является использование при дефаззификации метода отношения площадей. Анализ её имитационного процесса показал, что данный метод позволяет компенсировать ошибку сужения интервала дефаззификации.

Ключевые слова: дефаззификация; метод отношения площадей; метод центра тяжести; сужение интервала дефаззификации.

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 23-21-00071.

© Милостная Н. А., 2023

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Милостная Н. А. Компенсация ошибки сужения интервала дефазификации методом отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 111–122. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-111-122>.

Поступила в редакцию 18.01.2023

Подписана в печать 14.02.2023

Опубликована 30.03.2023

Compensation for the Error of Narrowing the Defuzzification Range by the Areas' Ratio Method

Natalya A. Milostnaya¹ ✉

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

✉ e-mail: nat_mil@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to examine the hypothesis that the area ratio method can be used to compensate for the defuzzification interval narrowing error inherent in traditional models, such as center of gravity sums, height models, first maxima, mean maxima, and last maxima.

Methods. A fuzzy model consisting of two input variables and one output variable was used to analyze the properties of the area ratio method. The input variables had two triangular membership functions each, and the output variable had three triangular membership functions. The knowledge base consisted of four fuzzy rules. Zadeh's compositional rule was used as an implication model. Two models of classical center of gravity and a model based on the area ratio method were used in the defuzzification process.

Results. In the course of experimental studies, it was found that the proposed defuzzifier based on the area ratio method compensates the error of narrowing the defuzzification interval. It was also found during the experimental studies that when using the center-of-gravity model, a resultant surface that only 50% overlaps with the caliper of the output variable is formed at the output, which forms the error of defuzzification interval narrowing. When the area ratio method is used, the resulting surface overlaps 100% with the output variable caliper, suggesting that the area ratio method eliminates the error associated with defuzzification interval narrowing.

Conclusion. This article presents a fuzzy MISO model that is used to analyze the properties of the area ratio method. A distinctive feature of the proposed model is the use of the area ratio method in defuzzification. Analysis of its simulation process has shown that this method allows to compensate the error of defuzzification interval narrowing.

Keywords: defuzzification; area ratio method; center of gravity method; defuzzification interval narrowing.

Financing: The work was carried out within the framework of the RGNF grant No. 23-21-00071.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Milostnaya N. A. Compensation for the Error of Narrowing the Defuzzification Range by the Areas' Ratio Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer 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>.

Received 18.01.2023

Accepted 14.02.2023

Published 30.03.2023

Введение

Модели дефаззификации – это методы преобразования нечётких выводов в конкретные числовые значения. Наиболее используемыми моделями дефаззификации являются следующие методы.

Метод центра тяжести – это одна из наиболее часто используемых и простых моделей дефаззификации [1; 2; 3]. Она использует центр тяжести нечёткого множества, определяемого на суппорте выходной переменной в качестве результата. При этом центр тяжести вычисляется как средневзвешенное значение всех элементов нечёткого множества.

Упрощённый метод центра тяжести – этот метод также часто использует при дефаззификации результирующей переменной, но в отличие от первого метода на выходе используются синглтонные (одноэлементные) функции принадлежности.

Метод первого максимума – этот метод выбирает максимальное значение центра тяжести первой функции принадлежности в выходном нечётком множестве в качестве результата вывода чёткого значения [4].

Метод среднего максимума – этот метод выбирает максимальное значение

центра тяжести средней функции принадлежности в выходном нечётком множестве в качестве результата вывода чёткого значения [5].

Метод последнего максимума выбирает максимальное значение центра тяжести последней функции принадлежности в выходном нечётком множестве в качестве результата вывода чёткого значения [6].

Метод центра сумм – для получения результирующей переменной используются только центральные значения активизируемых выходных функций принадлежности [7].

Метод высот – этот метод является упрощённым вариантом метода центра сумм, и в отличие от него на выходе используется также одноэлементные функции принадлежности [8].

Основными недостатками метода центра тяжести являются несколько ошибок. Во-первых, сужение интервала дефаззификации, которая заключается в том, что на выходе нечёткой модели невозможно получить минимальное или максимальное значение из допустимого значения суппорта выходной переменной. Во-вторых, нечувствительность метода, заключающаяся в невозможности генерации нечётко-логическим выводом более широкого диапазона управляю-

щих сигналов, который приводит к снижению качества управления, а также на этапе глобальной агрегации активизируется только одно правило, имеющее максимальную степень активизации заключений нечётких правил. В-третьих, снижение чувствительности, когда суппорты выходных переменных значительно различаются по ширине. Поскольку другие модели дефаззификации основаны на методе центра тяжести, то им свойственны те же ошибки, что и методу центра тяжести [9].

Исследованием свойств моделей дефаззификации и оценкой количественных характеристик вышеуказанных методов дефаззификации посвящено значительное число научных публикаций. Так в работе [10] авторы сравнивают различные модели дефаззификации, включая центр тяжести, упрощенный центр тяжести и методы максимумов. В работе [11] авторы исследуют работоспособность метода центра тяжести с более простыми моделями дефаззификации. В работе [12] авторы также исследуют и осуществляют экспериментальную проверку методов дефаззификации при разработке систем искусственного интеллекта.

Варианты компенсации вышеуказанных ошибок заключаются в следующем. Во-первых, ряд исследователей рекомендует использовать параметризованные функции принадлежности для обеспечения разбиения условия единства и их непрерывности. Во-вторых,

выполнения требования, чтобы центры смежных функций принадлежности пересекались на величине равной 0,5 [13; 14]. Однако данные способы не позволяют компенсировать ошибку сужения интервала дефаззификации в полной мере. Поэтому в данной статье рассмотрен метод отношения площадей, позволяющий компенсировать эту ошибку [15].

Материалы и методы

Для моделирования метода центра тяжести и определения ошибки сужения интервала дефаззификации рассмотрим нечётко-логическую модель, имеющую две входные переменные и одну выходную переменную.

Пусть входные переменные заданы двумя функциями принадлежности и заданы следующими формулами:

$$X_1 = \{x_{11}\} + \{x_{12}\}, \quad (1)$$

$$X_2 = \{x_{21}\} + \{x_{22}\}, \quad (2)$$

где X_1, X_2 – входы нечёткой системы; x_{ij} – функции принадлежности входных переменных.

Пусть выходная переменная Y определяется тремя функциями принадлежности и записывается как

$$Y = \{y_1\} + \{y_2\} + \{y_3\}. \quad (3)$$

Рассмотрим функции принадлежности входных и выходной переменных (рис. 1).

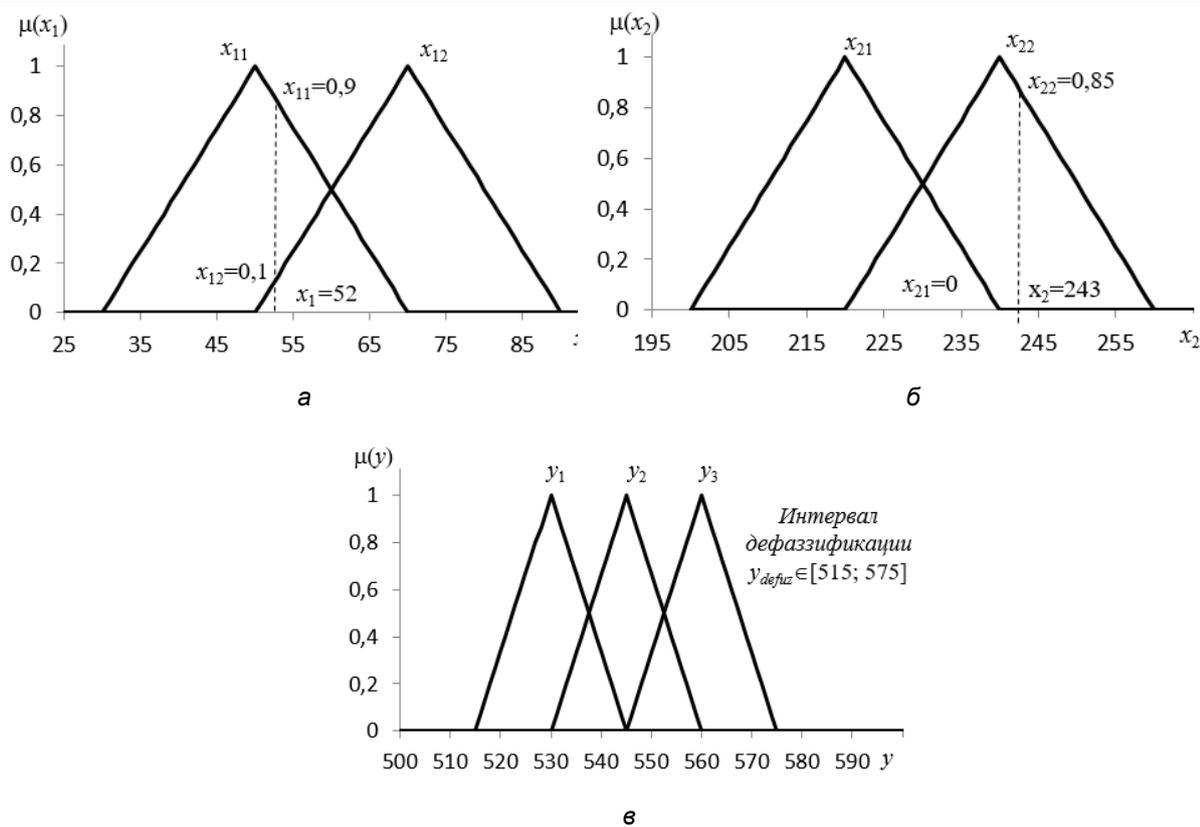


Рис.1. Функции принадлежности: а – первая входная переменная; б – вторая входная переменная; в – выходная переменная

Fig. 1. Membership function: а – first input variable; б – second input variable; в – output variable

Степени принадлежности входных переменных [16] рассчитываются по формуле

$$\mu_x(x) = \text{trimf}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (4)$$

где a, b, c, d – лингвистические метки треугольных ФП; x – чёткое значение ядра нечёткого множества.

База знаний состоит из четырёх нечётких правил:

FR₁: Если x_1 есть x_{11} И x_2 есть x_{21} Тогда y есть $\mu(y_1)$,

FR₂: Если x_1 есть x_{11} И x_2 есть x_{22} Тогда y есть $\mu(y_2)$,

FR₃: Если x_1 есть x_{12} И x_2 есть x_{21} Тогда y есть $\mu(y_2)$,

FR₂: Если x_1 есть x_{12} И x_2 есть x_{22} Тогда y есть $\mu(y_3)$. (5)

Композиционное правило Заде формирует три правила активации:

$$\begin{aligned} \mu(y_1) &= \min(x_{11}, x_{21}), \\ \mu(y_2) &= \max(\min(x_{11}, x_{22}); \min(x_{12}, x_{21})), \\ \mu(y_3) &= \min(x_{12}, x_{22}). \end{aligned} \quad (6)$$

Для дефаззификации используется метод центра тяжести [17]:

$$y_{defuz} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (7)$$

Для анализа свойств метода отношения площадей на языке программирования VBA была разработана его программная модель, которая представлена в листинге:

Function Defuzzy() As Double

Dim H As Double, S As Double, MasS(1 To 3) As Double, B As Integer,
Osnovanie As Integer

Dim y As Integer, Counter As Integer

Dim i, j, t As Integer

Dim Summ, Dol As Double

B = ThisWorkbook.Worksheets("Defuzzy").Range("am" & (166))

Osnovanie=(ThisWorkbook.Worksheets("Defuzzy").Range("p" & (4)) -
ThisWorkbook.Worksheets("Defuzzy").Range("n" & (4)))

y = 30

Summ = 0

For i = 1 To 3 Step 1

H = Application.WorksheetFunction.Max(Range(Cells(10, y), Cells(110, y)))

Select Case H

Case 0

MasS(i) = 0

Case 1

MasS(i) = B / 2

Case Else

Counter = 0

For j = 10 To 110 Step 1

If (ThisWorkbook.Worksheets(" Defuzzy ").Cells(j, y).Value = H) Then

Counter = Counter + 1

End If

Next j

MasS(i) = (H / 6) * (B + Counter + (B + Counter) * 2)

End Select

y = y + 1

Summ = Summ + MasS(i)

Next i

ThisWorkbook.Worksheets(" Defuzzy ").Cells(171, 30).Value = Summ

Dol = Summ / Osnovanie

Defuzzy = Round(Dol * (ThisWorkbook.Worksheets(" Defuzzy ").Range("ab" & (4)) -
ThisWorkbook.Worksheets(" Defuzzy ").Range("r" & (4))) +
ThisWorkbook.Worksheets(" Defuzzy ").Range("r" & (4)), 1)

End Function

Результаты и их обсуждение

Во время экспериментальных исследований проводилось моделирование и исследование свойств моделей центра

тяжести и метода отношения площадей [18; 19; 20].

В первом эксперименте в процессе дефаззификации использовался метод центра тяжести (рис. 2).

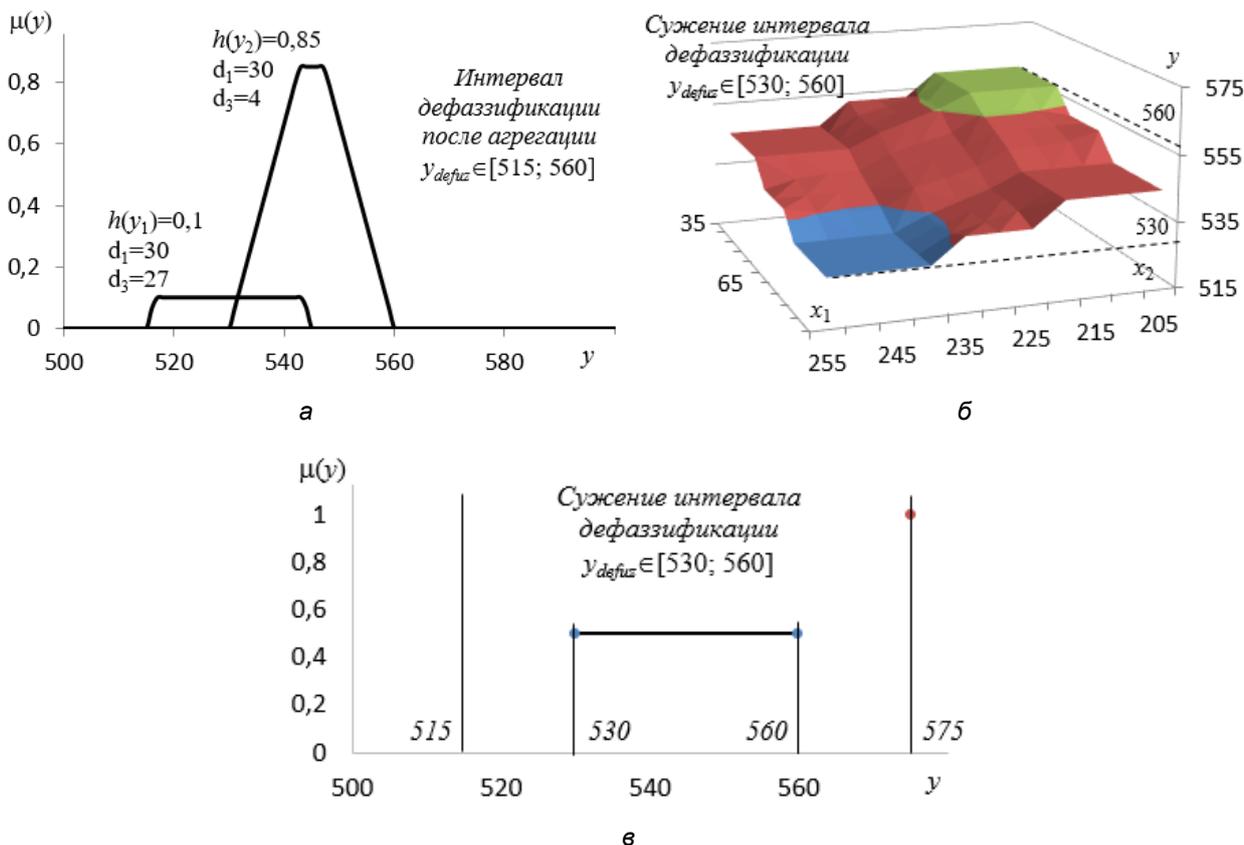


Рис. 2. Метод центра тяжести: а – глобальная агрегация; б – результирующая поверхность; в – сужение интервала дефаззификации

Fig. 2. Center of gravity method: а – global aggregation; б – resulting surface; в – narrowing of the defuzzification range

Анализ данных этого рисунка показал, что результирующие значения на выходе нечёткой модели находятся в диапазоне значений от 530 до 560 (рис. 2, б), в то время как выход модели должен соответствовать всему суппорту выходной переменной и находиться в диапазоне от 515 до 575 (рис. 1, в). Данная ошибка приводит к сужению интервала дефаззификации и свойственна любой нечёткой модели, основанной на использовании метода центра тяжести и

его модификаций (центр сумм, модель высот, первого, среднего и последнего максимумов и др.). Таким образом, при реализации любого нечётко-логического вывода появляются зоны нечувствительности (на рис. 2, в это интервал $[515;530] \cup [560;575]$), т. е. при реализации нечёткого вывода теряется 50% выходной информации.

Во втором эксперименте в процессе дефаззификации использовался метод отношения площадей (рис. 3).

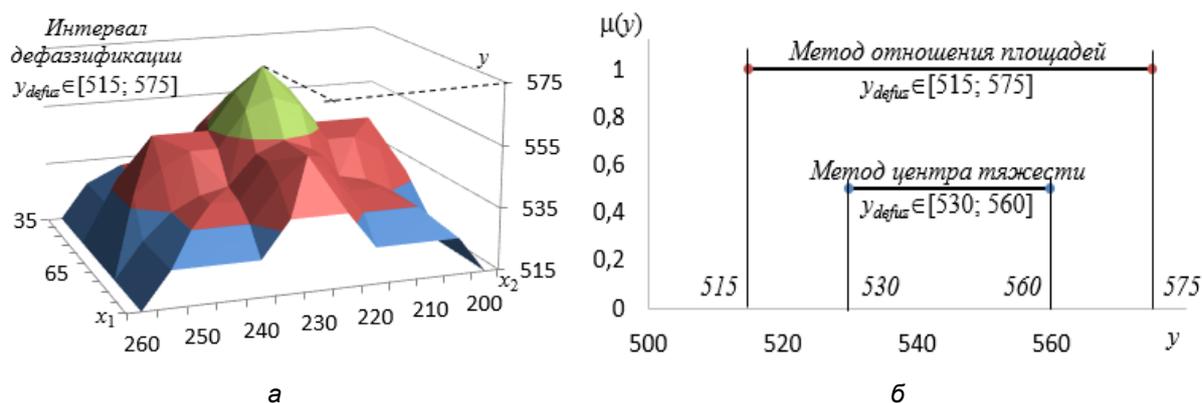


Рис. 3. Метод отношения площадей: а – результирующая поверхность; б – сужение интервала дефаззификации

Fig. 3. Method of area's ratio: а – resulting surface; б – narrowing of the defuzzification range

Преимущество метода отношения площадей заключается в том, что он компенсирует ошибку сужения интервала дефаззификации. Для рассмотренной выше модели центра тяжести (рис. 2) при использовании метода отношения площадей результирующая поверхность (рис. 3, а) находится во всём диапазоне суппорта выходной переменной [515; 575] (рис. 3, б). Это обстоятельство свидетельствует о том, что метод отношения площадей компенсирует ошибку сужения интервала дефаззификации, что позволяет увеличить производительность и быстрдействие любой нечёткой модели.

Выводы

В данной статье представлен способ компенсации ошибки сужения интервала дефаззификации в системе нечётко-логического вывода. Данный способ основан на использовании в его структуре метода отношения площадей. Программная модель на языке программирования VBA позволяет ознакомиться с математической реализацией метода отношения площадей. Проведено имитационное моделирование нечётко-логического вывода. В ходе экспериментальных исследований подтверждено, что метод отношения площадей позволяет компенсировать ошибку сужения интервала дефаззификации.

Список литературы

1. 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. <https://doi.org/10.14489/vkit.2015.09.pp.032-041>.
2. Talon A., Curt C. Selection of appropriate defuzzification methods: Application to the assessment of dam performance // Expert Systems with Applications. 2017. N 70. P.160–174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.09.004>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.
4. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Kulabuhov S. A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // *Applied Soft Computing Journal*. 2017. N 59. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.05.040>.
5. Van Broekhoven E., De Baets B. Monotone Mamdani-Assilian models under mean of maxima defuzzification // *Fuzzy Sets and Systems*. 2008. N 159(21). P. 2819–2844. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2008.03.014>.
6. Piegat A. *Fuzzy Modelling and Control*. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001. 725 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
7. Sain D., Mohan B. M. Modeling, simulation and experimental realization of a new non-linear fuzzy PID controller using Center of Gravity defuzzification // *ISA Transactions*. 2021. N 110. P. 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.048>.
8. Arun Neelimegham, Murali Bosukonda. Modeling and Computational Aspects of Non-linear Fuzzy TITO PI/PD Controller via Height Defuzzification // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51 (1). P. 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.05.046>.
9. Leekwijck W. V., Kerre E. E. Defuzzification: criteria and classification // *Computer Science. Fuzzy Sets Syst*. 1999. N 108. P. 159–178. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00337-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00337-0).
10. Nidhi Kataria. A Comparative Study of the Defuzzification Methods in an Application // *The IUP Journal of Computer Sciences*. 2010. Vol. 4, N 4. P. 48–54.
11. Shepelev G. I. Effects of Defuzzification Methods on the Results of Comparing Fuzzy Alternatives // *Scientific and Technical Information Processing*. 2022. N 49. P. 364–370. <https://doi.org/10.3103/S0147688222050112>.
12. Evolutionary Design of Linguistic Fuzzy Regression Systems with Adaptive Defuzzification in Big Data Environments / López S., Márquez A. A., Márquez F. A. [et al.] // *Cogn Comput*. 2019. N 11. P. 388–399. <https://doi.org/10.1007/s12559-019-09632-4>.
13. Leekwijck W. V., Kerre E. E. Continuity focused choice of maxima: yet another defuzzification method // *Computer Science. Fuzzy Sets Syst*. 2001. N 122. P. 303–314. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(00\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(00)00025-7).
14. High dimensional neurofuzzysystems: overcoming the curse of dimensionality / Brown M., Bossley K. M., Mills D. J., Harris C. J. // *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ – IEEE)*. 1995. N 4. P. 2139–2146. <https://doi.org/10.1109/fuzzy.1995.409976>.
15. 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. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.

16. Милостная Н. А. Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 3. С. 70–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.
17. 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. <https://doi.org/10.14489/vkit.2015.07.pp.007-015>.
18. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания на основе нечеткой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 76–82.
19. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Милостная Н. А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29, № 2. С. 71–84. <https://doi.org/10.14357/08696527190207>.
20. Прикладные нейро-нечеткие вычислительные системы и устройства / М. В. Бобырь, С. Г. Емельянов, А. Е. Архипов, Н. А. Милостная. М.: ИНФРА-М, 2023. 263 с. <https://doi.org/10.12737/1900641>.

References

1. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Defuzzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei [Defuzzification of fuzzy inference on the basis of the differential areas]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 9 (135), pp. 32–41. <https://doi.org/10.14489/vkit.2015.09.pp.032-041>
2. Talon A., Curt C. Selection of appropriate defuzzification methods: Application to the assessment of dam performance. *Expert Systems with Applications*, 2017, no. 70, pp. 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.09.004>
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. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>
4. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Kulabuhov S. A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio. *Applied Soft Computing Journal*, 2017, no. 59, pp. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.05.040>
5. Van Broekhoven E., De Baets B. Monotone Mamdani-Assilian models under mean of maxima defuzzification. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008, no. 159 (21), pp. 2819–2844. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2008.03.014>
6. Piegat A., *Fuzzy Modelling and Control*. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001. 725 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>

7. Sain D., Mohan B. M. Modeling, simulation and experimental realization of a new non-linear fuzzy PID controller using Center of Gravity defuzzification. *ISA Transactions*, 2021, no. 110, pp. 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.048>
8. Arun Neelimegham, Murali Bosukonda. Modeling and Computational Aspects of Non-linear Fuzzy TITO PI/PD Controller via Height Defuzzification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, pp. 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.05.046>
9. Leekwijck W. V., Kerre E. E. Defuzzification: criteria and classification. *Computer Science. Fuzzy Sets Syst*, 1999, no. 108, pp. 159–178. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00337-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00337-0)
10. Kataria Nidhi. A Comparative Study of the Defuzzification Methods in an Application. *The IUP Journal of Computer Sciences*, 2010, vol. 4, no. 4, pp. 48–54. <https://ssrn.com/abstract=1727025>
11. Shepelev G. I. Effects of Defuzzification Methods on the Results of Comparing Fuzzy Alternatives. *Scientific and Technical Information Processing*, 2022, no. 49, pp. 364–370. <https://doi.org/10.3103/S0147688222050112>
12. López S., Márquez A. A., Márquez F. A., eds. Evolutionary Design of Linguistic Fuzzy Regression Systems with Adaptive Defuzzification in Big Data Environments. *Cogn Comput*, 2019, no. 11, pp. 388–399. <https://doi.org/10.1007/s12559-019-09632-4>
13. Leekwijck W. V., Kerre E. E. Continuity focused choice of maxima: yet another defuzzification method. *Computer Science. Fuzzy Sets Syst*, 2001, no. 122, pp. 303–314. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(00\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(00)00025-7)
14. Brown M., Bossley K. M., Mills D. J., Harris C. J. High dimensional neurofuzzysystems: overcoming the curse of dimensionality. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ – IEEE)*, 1995, no. 4, pp. 2139–2146. <https://doi.org/10.1109/fuzzy.1995.409976>
15. 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. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>
16. Milostnaya N. A. Issledovanie ustoichivosti neuro-nechetkoi sistemy vyvoda, osnovannoi na metode otnosheniya ploshchadei [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, no. 25 (3), pp. 70–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>
17. 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 logic inference]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 7 (133), pp. 7–15. <https://doi.org/10.14489/vkit.2015.07.pp.007-015>
18. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Modelirovanie protsessa upravleniya temperaturnym rezhimom v zone rezaniya na osnove nechetkoi [Simulation of control of temperature mode in

cutting area on the basis of fuzzy logic]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 3, pp. 288–295.

19. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [The method of depth map calculation based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and Means of Informatics*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 71–84. <https://doi.org/10.14357/08696527190207>

20. Bobyr M. V., Emelyanov S. G., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. Prikladnye neuro-nechetkie vychislitel'nye sistemy i ustroystva [Applied neuro-fuzzy computing systems and devices]. Moscow, INFRA-M Publ., 2023. 263 p. <https://doi.org/10.12737/1900641>

Информация об авторе / Information about the Author

Милостная Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, начальник отдела подготовки и аттестации кадров высшей квалификации, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3779-9165

Natalia A. Milostnaya, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Department of Training and Certification of Highly Qualified Personnel, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3779-9165