УДК 519.7 681.5 677 687
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_290

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ОДЕЖДЕ С ЭЛЕКТРООБОГРЕВОМ

APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC-HEATED CLOTHING

О.М. ВЛАСЕНКО, А.А. КАЗНАЧЕЕВА, С.В. ЗАХАРКИНА

O.M. VLASENKO, A.A. KAZNACHEEVA, S.V. ZAKHARKINA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: vlasenko-om@rguk-ru

Расширение применения искусственного интеллекта в различных областях деятельности ставит задачу разработки интеллектуальной системы управления «умной одеждой». Применение нечеткой логики в системе управления температурой в одежде с электрообогревом позволит значительно расширить функционал и адаптивность системы, учитывать случайные факторы, воздействующие на систему извне, вызванные изменением состояния человека, его самочувствия, физической активности. Моделирование системы управления температурой электрообогреваемой одежды на базе нечеткой логики проводилось в программе FIS Matlab. С помощью встроенного инструмента 3D-визуализации получили трехмерную поверхность нечеткого вывода, которая позволила проанализировать зависимости между значениями выходных и входных переменных. Сравнительный анализ результатов проведенных исследований системы управления с релейным и классическим ПИД-регулированием и системы на базе нечеткой логики показывает лучшие результаты последней в способности адаптироваться к изменяющимся случайным возмущающим факторам, масштабируемости и быстродействии. Уменьшение времени отклика на изменение входного воздействия позволяет быстро регулировать температуру обогрева для обеспечения комфорта и безопасности пользователя.

The expansion of the use of artificial intelligence in various fields of activity poses the urgent task of developing an intelligent control system for “smart clothing”. The use of fuzzy logic in the temperature control system for electrically heated clothing will significantly expand the functionality and adaptability of the system, and will allow for random factors affecting the system from the outside, caused by

changes in a person's condition, well-being, physical activity. Modeling of the temperature control system for electrically heated clothing based on fuzzy logic was carried out in the FIS Matlab program. Using the built-in 3D visualization tool, we obtained a three-dimensional fuzzy inference surface, which allowed us to analyze the dependencies between the values of output and input variables. A comparative analysis of the results of the conducted studies showed that the use of a control system based on fuzzy logic is superior to relay control and PID control in the ability to adapt to changing random disturbance effects, scalability and speed of response. Reducing the response time to changes in input allows for quick adjustment of the heating temperature to ensure user comfort and safety.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, возмущающие воздействия, фазификация, система нечеткого вывода, регулирование температуры, электрообогреваемая одежда, интеллектуальная система управления, объект управления.

Keywords: fuzzy logic controller, disturbance effects, fuzzification, fuzzy inference system, temperature control, electrically heated clothing, intelligent control system, control object.

Введение

Активное внедрение искусственного интеллекта во все сферы экономической и социальной деятельности делает актуальной задачу применения новых технологий в сфере разработки одежды и текстильных материалов. Современное развитие технической базы, вычислительных мощностей, теоретических и практических наработок в области интеллектуальных систем переводит задачу разработки «умной одежды» на новый уровень.

Термин «умная одежда» не является строгим и на разных этапах технологического развития употреблялся с разным значением: и как одежда, оснащенная различными устройствами для мониторинга показателей жизнедеятельности человека, и как помощник в активной деятельности, и как средство создания теплового комфорта [1, 2]. Известные разработки в области электрообогреваемой одежды показывают, что автоматическое регулирование достаточно эффективно позволяет поддерживать заданную температуру с учетом изменения условий окружающей среды [2, 3, 13…15].

Применение такой интеллектуальной технологии, как нечеткая логика в системе управления температурой в одежде с электрообогревом, позволит значительно расширить функционал и адаптивность системы, повысить надежность и качество регулирования и, как следствие, комфорт человека. Нечеткая логика в дополнение к классическому регулированию по отклонению позволит учитывать случайные факторы, воздействующие на систему извне, а также вызванные изменением состояния человека, его самочувствия, физической активности.

Интеллектуальная система управления в отличие от традиционной предполагает в дополнение к основным элементам (объекту управления, управляющему устройству, измерительным и исполнительным устройствам) наличие блоков хранения, обработки, обобщения и пополнения знаний с целью осуществления коррекции цели и алгоритма управления. Именно это позволяет реализовывать эффективное управление объектом в неопределенных условиях работы, при случайном характере возмущающих воздействий, а также нестационарности самого объекта управления [4].

Нечеткая логика является одной из теоретических основ создания интеллектуальных систем управления [4]. Данная технология основана на построении логико-лингвистических моделей: преобразование размытых неточных входных данных в обоб-

щенные категории по определенным правилам с помощью функций принадлежности [5], выработка на основании этих правил управляющих воздействий для исполнительных механизмов [6] и при необходимости обратное логико-лингвистическое преобразование для общения с пользователем на естественном неформальном языке. Разработка интеллектуального интерфейса – это еще одна ступенька к повышению комфорта пользователя. Подобный пользовательский интерфейс предполагает, что пользователь взаимодействует с системой управления и вводит в нее команды на естественном языке, а после цикла преобразований, формирования и выполнения управляющих воздействий пользователь получает от средств измерения как массив точных данных, так и преобразованные в нечеткую форму данные для поддержания человеко-машинного диалога, обучения и пополнения базы знаний.

Применение нечеткой логики в управлении температурой

Аппарат теории нечетких множеств, разработанный Л. Заде [5], внедрен в системы управления динамическими объектами Мамдами [6]. В отличие от детерминированной системы, нечеткая логика оперирует не определенными точными значениями переменных, а неточными категориями, диапазонами, в которые эти переменные можно отнести. Границы этих диапазонов или интервалов определяются полностью истинным и полностью ложным состоянием переменной. В систему управления должен быть занесен перечень нечетких правил, сформулированных оператором, которые применяются к получаемому множеству входных переменных. На основании этих правил проводятся операции обработки множества нечетких переменных. Чтобы словесную информацию, получаемую от оператора, можно было использовать в ПИД-регуляторах, применяют лингвистические переменные. В результате обработки данных формируется нечеткий логический вывод, на основании которого вырабатываются регулирующие воздействия, то есть осуществляется преобразование управляющих переменных из нечеткой формы в вид, принимаемый исполнительными устройствами и объектом управления [7, 8].

На рис. 1 приведена структура системы управления с нечетким регулятором (НР) [9, 10]. В основе НР лежат блоки фаззификации (Ф), дефаззификации (ДФ), логического вывода (БЛВ) и база правил (БП).

Блок фаззификации преобразует измеряемые сигналы, поступающие от объекта *y(t)*, ошибку *ε(t)* и производную от ошибки в нечеткие переменные *ã*, которые затем обрабатываются в блоке логического вывода с учетом выражений из базы правил. БЛВ выдает нечеткие переменные для управляющего воздействия *ũ*. Далее это множество в блоке дефаззификации преобразуется в четкие сигналы управления *u(t)*, поступающие на исполнительные механизмы, воздействующие на объект управления. Диапазон входных переменных разбивается на подмножества (*NL – Negative Large, NM – Negative Medium, NS – Negative Small, Z – Zero, PS – Positive Small, PM – Positive Medium, PL – Positive Large*), для каждого из которых строится функция принадлежности [7].

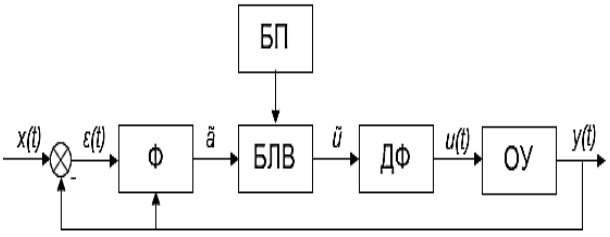

Рис. 1

Форма функции принадлежности зависит от решаемой задачи, чаще всего используют треугольную форму [7, 8]. Количество множеств, на которые разбивают входной массив данных, также может быть произвольным, однако с увеличением количества переменных возрастает трудоемкость формулировки правил для всех комбинаций [7]. Известно, что для построения нечеткой модели системы достаточно, если размерность множества входных переменных будет находиться в диапазоне от двух до двенадцати [4...8, 11, 12].

Применение нечеткой логики в системе управления электрообогреваемой спецодежды позволит оптимально поддерживать комфортную температуру внутри пододежного пространства с учетом нескольких одновременно действующих возмущающих воздействий как случайного, так и постоянного характера: температуры окружающей среды, нестационарности человека как объекта обогрева (параметров физического состояния человека, его физической активности), неравномерного расхода энергии от автономного источника питания и других факторов, связанных с задачами, которые должен решать человек в обогреваемой одежде. Как дополнительный функционал в системе при развитии может быть добавлено голосовое управление режимами обогрева, а также использование нечетких категорий ввода данных на дисплее человеко-машинного интерфейса.

В работе описано построение системы управления на базе нечеткой логики для прототипа электрообогреваемой одежды, в основе которой лежат нагревательные секции, выполненные из углеродных лент [13, 14]. Проведены экспериментальные исследования и получены динамические модели нагревательных секций [15], выполнено моделирование автоматической системы регулирования на базе микроконтроллера Arduino Nano и цифровых датчиков температуры DS18B20. Исследованы варианты релейного и ПИД регулирования температуры.

Для разработки модели системы управления с нечеткой логикой использовали функционал программы FIS Matlab. На первом этапе определили перечень нечетких переменных, задали нечеткие правила и настроили систему нечеткого вывода (СНВ). Входными переменными системы были приняты температура окружающей среды (*t_окр*) и температура, измеряемая датчиком, установленным на одежде пользователя с внутренней стороны (*ЗЛКЧ*). Выходной переменной для СНВ принималось напряжение питания (U_n), которое подавалось на обогревательную секцию [11], в СНВ оно выводилось в процентах от номинального значения. Нечеткие множества определялись категориями *жарко, холодно, тепло.* В соответствии с данными состояниями соотносили показания датчиков, информация обрабатывалась блоком логического вывода, который формировал выходное значение напряжения питания, подаваемого на обогревательную секцию.

Для определения количества значений лингвистической переменной (ЛП) использовали общепринятые термы-множества [7]: NB – отрицательное большое; NM – отрицательное среднее; NS – отрицательное малое; Z – нуль, близкое к нулю; PS – положительное малое; PM – положительное среднее; PB – положительное большое. Для каждого подмножества на основании проведенных ранее экспериментальных исследований выбирали диапазон значений [14].

В табл. 1 приведены десять из двадцати девяти правил на основе логических методов И и ИЛИ, которые были введены в систему для установления взаимосвязи между входными и выходными переменными.

Таблица 1

№ правила	Формулировка правила
1	If (t_окр is NS) and (ЗЛКЧ is NB) then (Un is PB)
2	If (t_окр is NS) and (ЗЛКЧ is Z) then (Un is NS)
3	If (t_окр is NS) and (ЗЛКЧ is PB) then (Un is NB)
4	If (t_окр is NS) and (ЗЛКЧ is PS) then (Un is Z)
5	If (t_окр is NS) and (ЗЛКЧ is PS) then (Un is PM)
6	If (t_окр is NB) and (ЗЛКЧ is NB) then (Un is PB)
7	If (t_окр is NB) and (ЗЛКЧ is Z) then (Un is Z)
8	If (t_окр is NB) and (ЗЛКЧ is PB) then (Un is NB)
9	If (t_окр is NB) and (ЗЛКЧ is PS) then (Un is Z)
10	If (t_окр is NB) and (ЗЛКЧ is NS) then (Un is PM)

Окно настройки правил системы нечеткого вывода приведено на рис. 2. Перемещая вручную с помощью мыши красные линии для каждой входной переменной, задавали комбинации значений. Далее с помощью блока нечеткого вывода, заложенного в программе, вычислялись соответствующие значения выходной переменной. На рисунке приведен пример настройки для температуры окружающей среды *t_окр* = -40.55°C, температуры пододежного пространства *ЗЛКЧ* = 13.75°C. Для данной комбинации входных сигналов блок нечеткого вывода возвратил значение выходной переменной U_n = 61.3%.

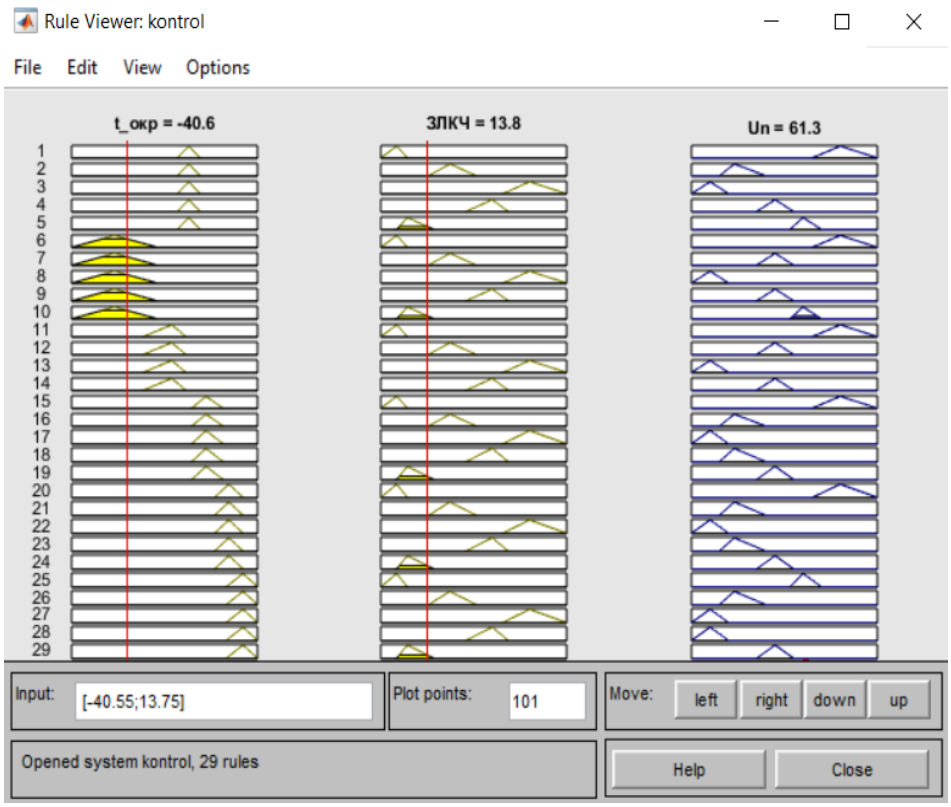

Рис. 2

Результаты исследования

Для проверки достоверности модели проведены экспериментальные исследования, получен массив данных, который использовался для настройки системы нечеткого вывода для различных значений входных переменных. Чтобы провести анализ поведения системы и оценить ее достоверность, соответствие физическому поведению реальной системы обогрева, использовали встроенный в FIS Matlab инструмент 3D-визуализации. С помощью него получили трехмерную поверхность нечеткого вывода (рис. 3), которая позволила установить зависимость между значениями входных и выходной переменных.

Построенная диаграмма позволила оценить работу системы нечеткого вывода и внести ряд изменений для ее улучшения и более корректной работы системы управления температурой электрообогреваемой одежды.

Диаграмма на рис. 3 явно показывает, что при уменьшении температуры пододежного пространства пользователю становится *холоднее*, уровень напряжения питания нагревательной секции повышается, то есть обогрев усиливается.

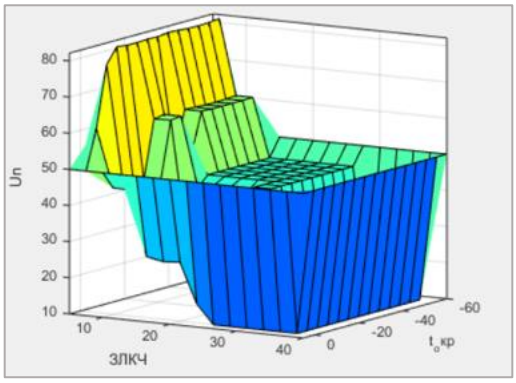

Рис. 3

На втором этапе моделирования системы управления температурой с нечеткой логикой была собрана структурная схема системы в программе Matlab Simulink (рис. 4) с использованием блока нечеткого регулятора Fuzzy Logic.

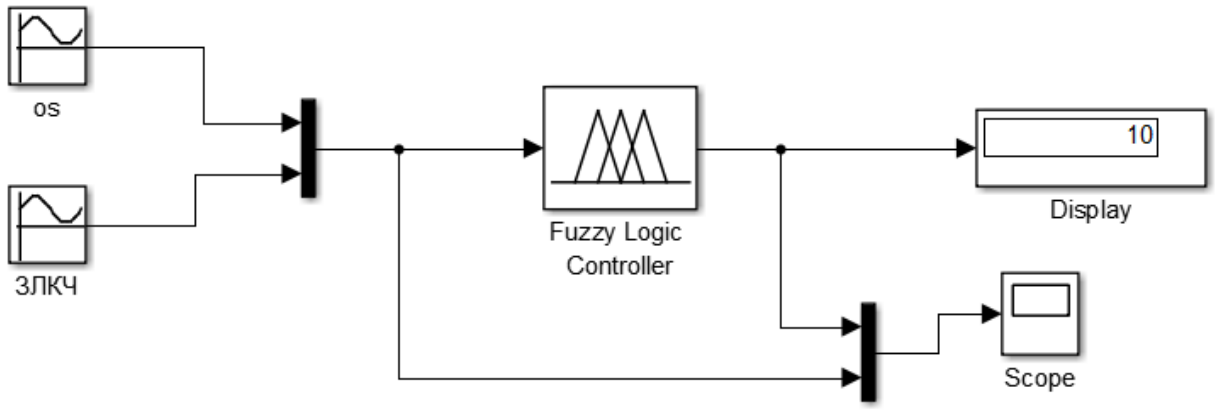

Рис. 4

На вход нечеткого регулятора Fuzzy Logic заведены два датчика температуры – окружающей среды и пододежного пространства. Созданная на первом этапе система нечеткого вывода заводится в настройках блока с расширением fis путем ввода установленного имени в соответствующем поле свойств. На рис. 5 приведены симуляционные графики изменения значений переменных: кривая 1 соответствует выходной переменной – напряжению питания в процентном соотношении от максимально возможного значения; кривая 2 показывает изменение температуры окружающей среды, °С; кривая 3 – изменение температуры пододежного пространства, °С. Для отработки взаимосвязей переменных в системе нечеткого вывода задавался синусоидальный характер их изменения.

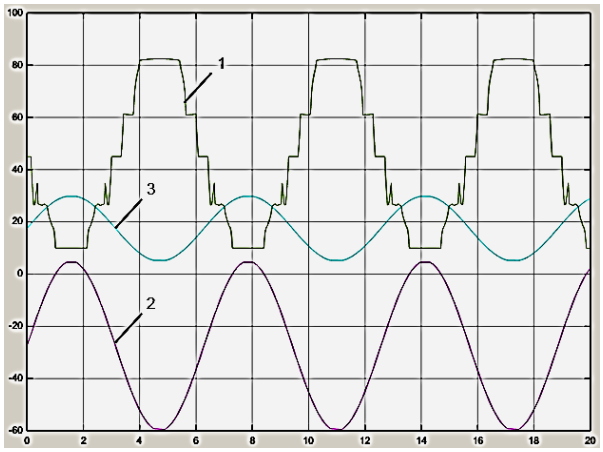

Рис. 5

Анализ кривых, приведенных на рис. 5, показывает, что система нечеткого вывода отрабатывает сигналы, поступающие с датчиков, в соответствии с логикой их изменения в реальной физической системе: чем ниже температура окружающей среды и пододежного пространства, тем сильнее включается обогрев. При этом уровень напряжения плавно адаптируется под уровень изменения температур.

Проведенное моделирование и исследование свойств системы управления температурой в электрообогреваемой спецодежде на базе нечеткой логики дают основания утверждать, что применение интеллектуальных технологий повышает эффективность и вариативность систем управления. Применение метода нечеткого регулирования позволяет создавать более гибкие, адаптированные системы, обеспечивающие быстрое и качественное регулирование. Дальнейшее развитие в области интеллектуальной системы управления электрообогреваемой одежды может идти в направлении голосового и дистанционного управления с применением нейросетевых технологий.

ВЫВОДЫ

Представленные в работе результаты моделирования системы управления одеждой с электрообогревом на базе нечеткой логики в сравнении с результатами проведенных ранее экспериментальных исследований системы регулирования температуры в одежде с релейным и ПИД-регулированием дают основание сделать вывод, что применение технологии нечеткой логики позволяет улучшить результаты управления

по нескольким критериям. Система управления способна адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и физической активности человека с сохранением необходимых запасов устойчивости. Система управления с нечетким регулятором масштабируема и может учитывать больше возмущающих факторов. Существенным преимуществом перед классическим регулированием является уменьшение времени отклика на изменение входного воздействия, что позволяет быстро регулировать температуру обогрева для обеспечения комфорта и безопасности пользователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кусмидинова М.Х., Решетникова Н.С.* «Умная одежда» как пример актуальной коллаборации современных информационных технологий и индустрии моды // Каспийский регион: политика, экономика, культура. 2020. № 4 (65). С. 134...140.

2. *Овчинников Д.Л., Тычков А.Ю., Чернышов Д.С., Сашина А.Д.* Разработка прототипа «умной» одежды с дистанционным контролем и управлением температурой посредством микроэлектронного исполнения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 102...109.

3. *Liu S., Wu J.* Development of user interaction(UI)-based electrical heated clothing incorporating knitted jacquard pattern for the elderly. Journal of Industrial Textiles, vol. 54, Nov 2024, P. 1...24.

4. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.

5. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets. Information and Control. 1965. № 8. P. 338…353.

6. *Mamdani E.H., Assilian S.* An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int. J. Man-Mach. Stud. 1975, vol. 7. p. 1…13.

7. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, 383 с.

8. *Усков А.А., Кузьмин А.В.* Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 143 с.

9. *Денисенко В.В.* Энциклопедия АСУ ТП. – URL: https:// www.reallab.ru//bookasutp (Дата обращения 04.06.2025)

10. *Mann G.K.I., Hu B.-G., Gosine R.G.* Fuzzy PID controller structures. - IEEE 1997 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 2, 25-28 May 1997, P. 788...791.

11. *Terano T., Asai K., Sugeno M.* Applied Fuzzy Systems // Kindle Edition. Academic Press, 2014. 314 pp.

12. *Аверкин А.Н.* Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: АСТ, 2018. 312 с.

13. *Власенко О.М., Казначеева А.А., Захаркина С.В.* К вопросу моделирования обогревающего слоя спецодежды с автоматическим самонастраивающимся регулированием // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2 (398). С. 152…158.

14. *Власенко О.М., Богдель Н.В.* Экспериментальное исследование обогревательной секции одежды как объекта автоматической системы регулирования температуры // Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета. М., 2024. Ч. 2. С. 77…82.

15. *Власенко О.М., Казначеева А.А., Захаркина С.В.* Идентификация динамической модели обогревательной секции одежды с углеродной лентой // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 4 (412). С. 253…258.

REFERENCES

1. *Kusmidinova M.H., Reshetnikova N.S.* Smart closing as an example of an actual collaboration between mjdern information technologies and the Fashion industry // The Caspian Region: Politic, Economics, Culture. 2020. № 4 (65). P. 134...140.

2. *Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Ju., Chernyshov D.S., Sashina A.D.* Development of a prototype of "smart" clothing with remote control and temperature control by means of microelectronic design // Measuring. Monitoring. Management. Control. 2022. № 4. P. 102...109.

3. *Liu S., Wu J.* Development of user interaction(UI)-based electrical heated clothing incorporating knitted jacquard pattern for the elderly. Journal of Industrial Textiles, vol. 54, Nov 2024, P. 1...24.

4. *Makarov I.M., Lohin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P.* Iskusstvennyj intellekt i intellektual'nye sistemy upravlenija / Otdelenie informacionnyh tehnologij i vychislitel'nyh sistem RAN. M.: Nauka, 2006. 333 s.

5. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets. - Information and Control. 1965. № 8, P. 338…353.

6. *Mamdani E.H., Assilian S.* An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. - Int. J. Man-Mach. Stud. 1975, vol. 7, p. 1…13.

7. *Rutkovskaja D, Pilin'skij M., Rutkovskij L.* Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2006, 383 s.

8. *Uskov A.A., Kuz'min A.V.* Intellektual'nye tehnologii upravlenija. Iskusstvennye nejronnye seti i nechetkaja logika. M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2004, 143 s.

9. *Denisenko V.V.* Jenciklopedija ASU TP. – URL: https:// www.reallab.ru//bookasutp (Data obrashhenija 04.06.2025)

10. *Mann G.K.I., Hu B.-G., Gosine R.G.* Fuzzy PID controller structures. - IEEE 1997 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 2, 25-28 May 1997, P. 788...791.

11. *Terano T, Asai K., Sugeno M.* Applied Fuzzy Systems // Kindle Edition. Academic Press, 2014. 314 pp.

12. *Averkin A.N.* Nechetkie mnozhestva v modeljah upravlenija i iskusstvennogo intellekta. M.: AST, 2018. 312 s.

13. *Vlasenko O.M., Kaznacheeva A.A., Zakharkina S.V.* About simulation of the heating layer of workwear with automatic self-adjusting regulation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. № 2 (398). P. 152…158.

14. *Vlasenko O.M., Bogdel N.V.* Experimental study of the heating section of clothing as an object of an automatic temperature regulation system // Problems of engineering sciences: formation of technological sovereignty. Moscow, 2024. Part 2. Pp. 77…82.

15. *Vlasenko O.M., Kaznacheeva A.A., Zakharkina S.V.* Dynamic model identification of the heating section of clothes with carbon tape // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. № 4 (412). S. 253…258.

Рекомендована кафедрой автоматики и промышленной электроники РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 10.06.25.