

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ  
НА ПРИМЕНЕНИЕ СИЛ И СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ  
НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА**

**METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF DECISION-MAKING ON  
THE USE OF FORCES AND MEANS OF ELECTRONIC CONTROL BASED  
ON THE CREATION OF A FUZZY INFERENCE SYSTEM**

*И.В. Коликов, канд. техн. наук В.В. Уткин*

*I.V. Kolikov, Ph.D. V.V. Utkin*

*Военный университет радиоэлектроники (г. Череповец)*

В статье на основе разработанного авторами программного обеспечения рассматривается вопрос создания систем нечеткого вывода в интересах повышения оперативности принятия решения на организацию и ведение радиоэлектронного контроля. Представлен обзор современного программного обеспечения, реализованного с использованием основных положений теории нечеткой логики и нечетких множеств. Приведены их основные недостатки и возможности по созданию систем нечеткого вывода для обеспечения радиоэлектронного контроля. Представлена структура и раскрыт принцип работы разработанного программного обеспечения, приведены возможности по созданию лингвистических переменных с определяемыми функциями принадлежности для моделирования сложной радиоэлектронной обстановки, формированию базы нечетких правил на естественном языке с возможностью оперативного изменения пользователем в условиях высокой динамики изменения структуры и параметров контролируемых радиоэлектронных средств. Предложен пример создания нечеткой системы вывода по электромагнитной доступности источников радиоизлучения.

**Ключевые слова:** радиоэлектронный контроль, нечеткая логика, вывод Мамдани, оценка радиоэлектронной обстановки, электромагнитная доступность.

The article considers the issue of creating fuzzy inference systems based on the software developed by the authors in order to increase the efficiency of decision-making for the organization and conduct of electronic control. An overview of modern software implemented using the main provisions of the theory of fuzzy logic and fuzzy sets is presented. Their main disadvantages and opportunities for creating fuzzy inference systems for providing electronic control are presented. The structure and the principle of operation of the developed software are presented, the possibilities for creating linguistic variables with definable membership functions for modeling a complex radio-electronic situation are presented, the formation of a base of fuzzy rules in natural language with the possibility of operational change by the user in conditions of high dynamics of changes in the structure and parameters of controlled radio-electronic means is presented. An example of creating a fuzzy inference system based on the electromagnetic availability of radio sources is proposed.

**Keywords:** electronic control, fuzzy logic, Mamdani's conclusion, assessment of the electronic situation, electromagnetic accessibility.

## Введение

Формальная логика в свое время была создана для борьбы с неопределенностью, неточностью представления человеческих знаний. В последние десятилетия возникла насущная необходимость создания методов, позволяющих формально описывать нестрогие, нечеткие понятия. Значительным шагом в этом направлении явился подход, основанный на использовании нечетких множеств Л. Заде, у которого впоследствии появились другие исследователи, такие как Р. Беллман, Н. Винер, А. Кофман, Д.А. Поспелов. На текущий момент теория нечетких множеств и нечеткая логика широко используются в прикладных задачах по управлению знаниями, в системах поддержки принятия решений в условиях неопределенности и ограниченных временных ресурсов, моделированию сложных систем, аппроксимации и классификации.

Успех применения нечеткой логики и нечетких множеств привел к разработке множества программных продуктов, реализующих основные задачи нечеткого моделирования [1]. Проведенный анализ данного программного обеспечения (ПО) показал отсутствие программных инструментов, способных обеспечить моделирование сложной радиоэлектронной обстановки (РЭО) в интересах повышения оперативности принятия решения на организацию и ведение радиоэлектронного контроля. Такая необходимость возникает в связи с тем, что на современном этапе трансформации форм ведения боевых действий наряду с новыми тенденциями развития систем связи и радиотехнического обеспечения [2, 11–13], оценка радиоэлектронной обстановки, характеризующийся неточностью, неполнотой априорных сведений о противоборствующей стороне и исходных данных, получаемых на этапе общей оценке текущей обстановке, является нетривиальной задачей для лица, принимающего решение в условиях ограниченных временных ресурсов.

Авторами в интересах повышения оперативности принятия решения на организацию и ведение радиоэлектронного контроля разработано программное обеспечение, основанное на принципах нечеткой логики, теории нечетких множеств и позволяющее моделировать сложную радиоэлектронную обстановку, с учетом специ-

фики предметной области функционирования радиоэлектронных средств и процесса радиоэлектронного контроля, а также задавать правила нечеткого вывода на естественном языке.

## Обзор программного обеспечения, построенного на принципах теории нечеткой логики и нечетких множеств

Подробный обзор программных инструментов, которые работают с нечеткой логикой и нечеткими множествами, можно найти в [1]. Большинство программного обеспечения с открытым исходным кодом, реализующие подходы нечеткой логики, предназначено для обеспечения функционирования систем поддержки принятия решений, машинного обучения, классификации и регрессионного анализа.

Одной из самых популярных сред, используемых для реализации инструментов нечеткой логики, является Matlab. Модуль «Fuzzy Logic Toolbox», который по-прежнему поддерживается разработчиком, поддерживает множество функций для создания систем нечеткого вывода [3, 4]. Основным недостатком Matlab является то, что он распространяется только на коммерческой основе.

PyFuzzy была первой библиотекой общего назначения для разработки систем с нечетким выводом, разработанной на языке программирования Python версии 2.7. PyFuzzy позволяет моделировать многочисленные типы нечетких множеств. Он также поддерживает экспорт и совместное использование систем с нечетким выводом с помощью файлов Fuzzy Control Language (FCL). Файлы FCL реализуют устаревший стандарт IEC 61131 (IEC61131-7), который был разработан для приложений нечеткого управления и долгие годы оставался фактически единственным стандартом для создания систем с нечетким выводом. Несмотря на свою полноту, PyFuzzy считается устаревшей и больше не поддерживается разработчиком, а вторая версия языка Python официально больше не поддерживается.

На сегодняшний день программное обеспечение, разработанное с использованием Python 3, включает библиотеки Scikit-Fuzzy и Fuzzylab [5], предназначенные для создания логических контроллеров. Fuzzylab не поддер-

живают определение пользовательских функций принадлежности, что снижает гибкость в моделировании таких сложных предметных областей, как радиоэлектронная обстановка. Более того, обе библиотеки не предоставляют возможности определения правил нечеткого вывода на естественном языке, что значительно снижает оперативность внесения изменений в систему нечеткого вывода, учитывая высокую динамику изменений структуры и параметров контролируемых систем радиоэлектронных средств и состояния среды распространения радиосигналов.

Программное обеспечение FuzzyR [6] представляет собой универсальный набор инструментов для нечетких рассуждений, реализованный на языке «R». Программный продукт Fispro, реализованный на языке C++, обладает графическим пользовательским интерфейсом.

Одна из самых последних и заслуживающая внимание реализаций программного обеспечения является библиотека JFML [7], единственная библиотека с открытым исходным кодом, включающая последний разработанный стандарт для представления систем нечеткого вывода IEEE 1855-2016, который определяет новый язык под названием FuzzyMarkup Language (FML). Данная библиотека также не предоставляет возможности определения правил нечеткого вывода на естественном языке [14].

Проведенный анализ программного обеспечения, реализующего системы нечеткого вывода, и их функций, предопределил объективную необходимость решения актуальной задачи по разработке программного обеспечения, позволяющего моделировать сложную радиоэлектронную обстановку, с учетом специфики понятийных знаний данной предметной области, в интересах повышения оперативности принятия решений на организацию и применение сил и средств радиоэлектронного контроля, с возможностью создания на естественном языке базы нечетких правил вывода и оперативной ее модификации [8–10].

### Описание разработанного программного обеспечения

Авторами на современном языке программирования Python 3 было разработано программ-

ное обеспечение (ПО) «FuzzyRC», позволяющее создавать нечеткие системы вывода в интересах повышения оперативности принятия решения на организацию и ведение радиоэлектронного контроля.

ПО «FuzzyRC» поддерживает следующие функции:

- создание многоугольных и функциональных (сигмоидальных, гауссовских и др.) функций принадлежности для гибкого определения значений различных лингвистических переменных (ЛП);

- определение произвольно сложных нечетких правил вывода, построенных с помощью логических нечетких операторов «AND», «OR», «NOT»;

- определение нечетких правил вывода в виде строк текста на естественном языке, позволяющих учитывать специфику предметной области функционирования радиоэлектронных средств и процесса радиоэлектронного контроля;

- возможность оперативной модификации базы правил, в условиях динамического изменения структуры и параметров контролируемых радиоэлектронных средств;

- моделирование радиоэлектронной обстановки на основе применения нечеткого вывода Мамдани.

Рассмотрим принцип работы ПО «FuzzyRC». В начале работы создается и инициализируется объект основного класса «FuzzyMainModul». Блок-схема процесса инициализации основного объекта представлена на рис. 1.

Значения лингвистических переменных (SetA1, SetA2, SetB1) являются объектами класса «FuzzySetsForTermLing». Входными параметрами конструктора данных объектов являются название значения лингвистической переменной и вид функции принадлежности, задаваемой либо в произвольном виде с помощью объекта «FuzzyPointsForSet», либо посредством вызова предопределенных функций (triangularFS, trapezoidalFS, GaussianFS, InvGaussianFS, doubleGaussianFS, InvSigmoidFS, SigmoidFS).

Например, SetA1 = FuzzySetsForTermLing (triangularFS (a = 0, b = 15, c = 20), term = «крайне высокая»), SetA2 = FuzzySetsForTermLing (trapezoidalFS (a = 10, b = 15, c = 25, d = 25), term = «умеренная»).

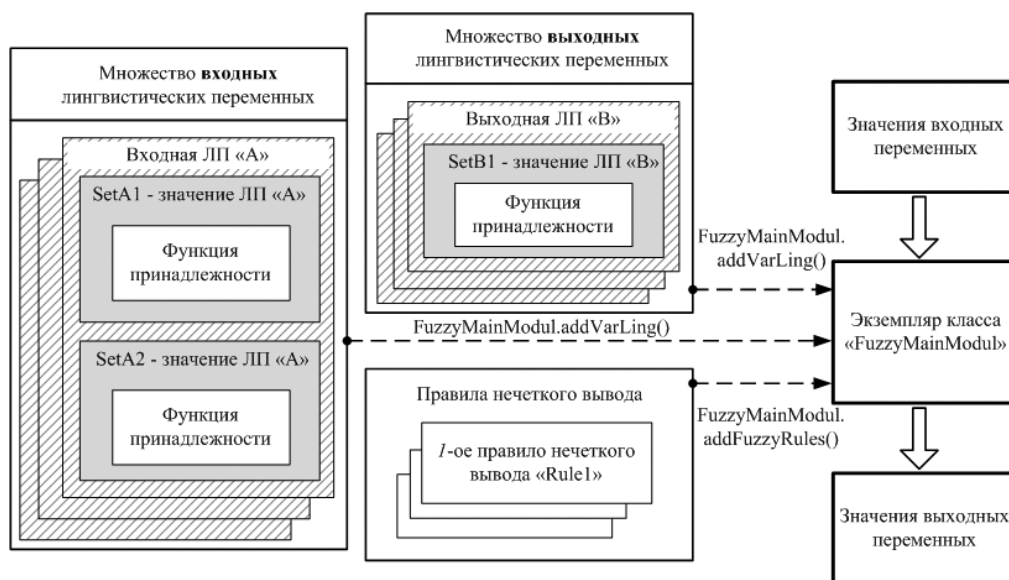


Рис. 1. Блок-схема процесса инициализации объекта класса «FuzzyMainModul»

Далее осуществляется определение самой лингвистической переменной и объединение ее с объектом основного класса «FuzzyMainModul», посредством вызова функции `addVarLing()`. Входными параметрами данной функции является строка, содержащая наименование лингвистической переменной, и объект класса «VarLing», аргументами которого являются множество заранее определенных значений лингвистической переменной и значения пределов универсального множества. Данные пределы могут быть как вычислены автоматически, так и указаны пользователем, используя необязательный аргумент «UnOfDis». Например, `FuzzyM.addVarLing («Интенсивность гидрометеоров», VarLing ([SetA1, SetA2], UnOfDis=[0,1000]))`.

Правила нечеткого вывода («Rule1», «Rule2») задаются строковыми значениями, в которых на естественном языке задаются правила с использованием лингвистических переменных, определенных функцией `addVarLing()`, с их значениями, также используя управляющие конструкции (IF, THEN, IS) и нечеткие логические операторы (AND, OR, NOT).

Например, `Rule1 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «крайне высокая») OR («интенсивность гидрометеоров» IS «умеренная») AND («расстояние до источника ИРИ» IS NOT «большое») THEN «степень поглощения» IS «существенная»»`.

Объединение правил с объектом основного класса «FuzzyMainModul» осуществляется

вызовом функции `addFuzzyRules()`, входными значениями которой является массив правил нечеткого вывода. Например, `FuzzyMainModul.addFuzzyRules ([Rule1, Rule2])`. Правила нечеткого вывода обрабатываются как строковые переменные способом рекурсивной разметки, учитывая обязательные управляющие конструкции и нечеткие логические операторы. Таким образом, правила нечеткого вывода представляются в виде деривационных деревьев (рис. 2). Узлами деривационного дерева являются управляющие конструкции, а листья дерева — лингвистические переменные и их значение.

Задание четких входных значений выполняется с помощью функции `SetInputCrispVar()`, входными параметрами которой являются название выбранной лингвистической переменной и ее конкретное входное значение.

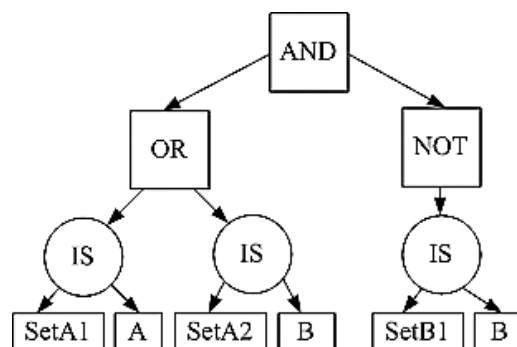


Рис. 2. Схема дерева вывода, создаваемого при синтаксическом анализе нечеткого правила Rule1

Результаты вывода возвращаются пользователю в виде пар «ключ-значение», где ключи представляют имена выходных лингвистических переменных.

### Оценка электромагнитной доступности источников радиоизлучения на основе применения разработанного программного обеспечения

Рассмотрим пример создания системы нечеткого вывода степени электромагнитной доступности источников радиоизлучения, с помощью разработанного ПО, в интересах повышения оперативности принятия решения на организацию и применение сил и средств радиоэлектронного контроля.

Опыт организации и применения средств радиоэлектронного контроля показывает, что время, выделяемое для оценки радиоэлектронной доступности, в современных условиях достаточно ограничено. За это время нужно обработать большое количество радиотрасс: построить профили, определить их характеристики, расчи-

тать множество промежуточных переменных и, в конечном счете, значения множителей дополнительного ослабления радиоволн. При этом не всегда имеется исходная информация для расчетов в полном объеме.

Возникает необходимость сокращения времени оценки электромагнитной доступности, в условиях неточности и неполноты исходной информации, также при ограниченных временных ресурсах.

Для примера использования программного обеспечения, введем лингвистические переменные с их значениями и функциями принадлежности.

Входная лингвистическая переменная (ЛП) «интенсивность гидрометеоров», значениями которой являются «крайне низкая», «низкая», «умеренная», «высокая», «экстремальная» (рис. 3).

Входная лингвистическая переменная «расстояние до источника радиоизлучения», значениями которой являются «незначительное», «среднее», «большое». Функции принадлежности отображены на рис. 4.

Выходная лингвистическая переменная «Степень затухания», значениями которой явля-

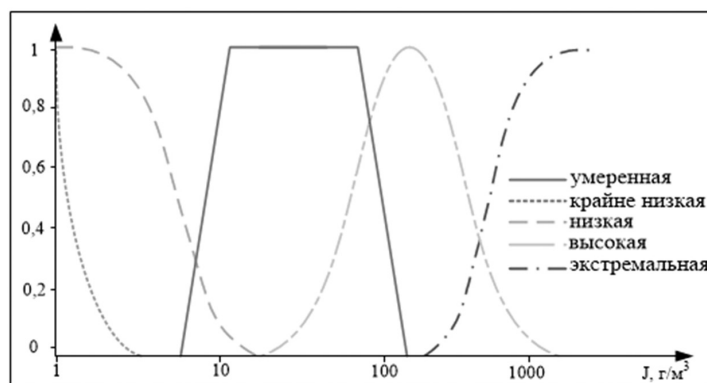


Рис. 3. Функции принадлежности значений ЛП «интенсивность гидрометеоров»

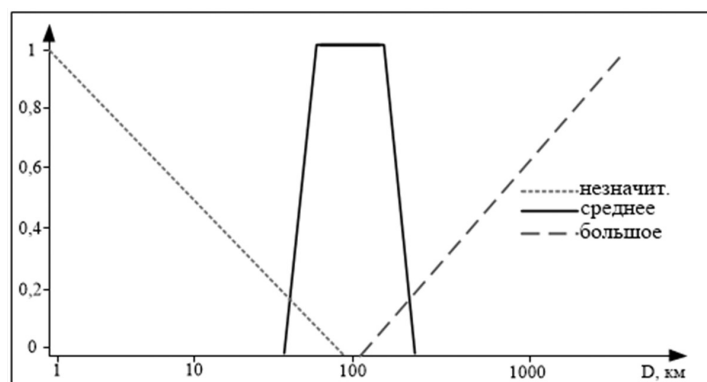


Рис. 4. Функции принадлежности значений ЛП «расстояние до источника радиоизлучения»



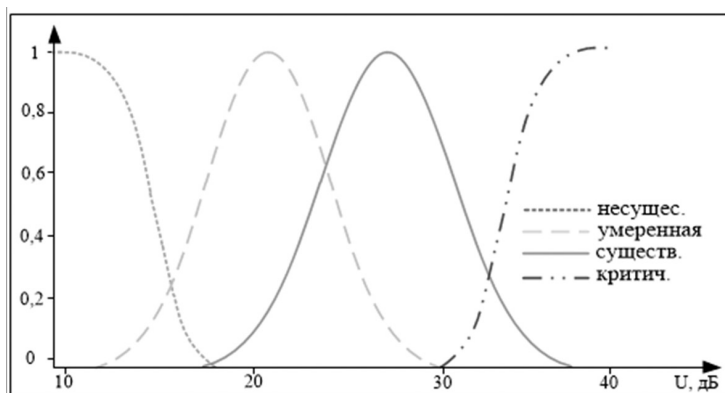


Рис. 5. Функции принадлежности значений ЛП «Степень затухания»

ются «несущественная», «умеренная», «существенная», «критическая». Функции принадлежности отображены на рис. 5.

На основе общих принципов распространения радиоволн и эмпирических знаний по применению средств радиотехнического контроля, определим множество правил вывода, используя введенные лингвистические переменные с их значениями.

1. FuzzyRul\_1 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «крайне низкая») AND («расстояние до источника ИРИ» IS NOT «большое») THEN «степень поглощения» IS «несущественная»».

2. FuzzyRul\_2 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «низкая») AND («расстояние до источника ИРИ» IS NOT «большое») THEN «степень поглощения» IS «несущественная»».

3. FuzzyRul\_3 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «низкая») AND («расстояние до источника ИРИ» IS «большое») THEN «степень поглощения» IS «умеренная»».

4. FuzzyRul\_4 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «умеренная») AND («расстояние до источника ИРИ» IS NOT «незначительное») THEN «степень поглощения» IS «умеренная»».

5. FuzzyRul\_5 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «высокая») AND («расстояние до источника ИРИ» IS «большое») THEN «степень поглощения» IS «существенная»».

6. FuzzyRul\_6 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «экстремальная») AND («расстояние до источника ИРИ» IS «среднее») THEN «степень поглощения» IS «существенная»».

7. FuzzyRul\_7 = «IF («интенсивность гидрометеоров» IS «экстремальная») AND («расстояние до источника ИРИ» IS «большое») THEN «степень поглощения» IS «критическая»».

После создания и инициализации необходимых объектов определим конкретные значения входных ЛП. Например, FuzzyM.SetInputCrispVar («Интенсивность гидрометеоров», 82); FuzzyM.SetInputCrispVar («Расстояние до ИРИ», 400).

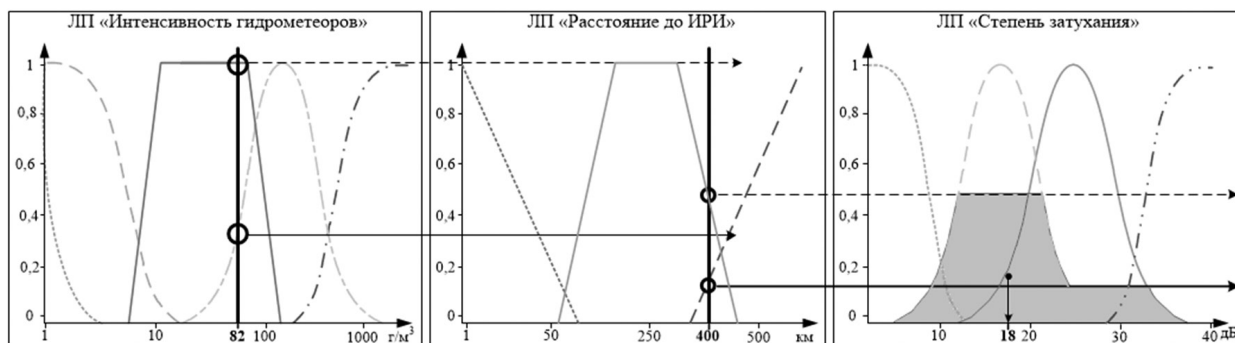


Рис. 6. Схема нечеткого вывода ЛП «Степень затухания» на основе метода Мамдани

При данных определенных входных значениях интенсивности гидрометеоров и расстояния до ИРИ для нечеткого вывода будет использовано два нечетких правила FuzzyRul\_4, FuzzyRul\_5, и на основе нечеткого вывода Мамдани получено значение выходной ЛП «Степень затухания» равное 18 Дб.

На рис 6. представлена схема, поясняющая процесс нечеткого вывода Мамдани при данных входных значениях.

Анализ процесса предложенного нечеткого вывода степени затухания и качественное сравнение с методами аналитического расчета электромагнитной доступности источников радиоизлучения показал очевидное преимущество систем нечеткого ввода по оперативности расчетов, при этом необходимо отметить, что при использовании аналитических методов точность расчетов итоговых значений затухания выше.

Приведенный пример наглядно показывает возможность применения программного обеспечения для создания системы нечеткого вывода в интересах повышения оперативности принятия решения на организацию и ведение радиоэлектронного контроля.

### Заключение

Авторами обосновано применение систем нечеткого вывода в интересах повышения оперативности организации и ведения радиоэлектронного контроля на основе разработанного программного обеспечения.

Возможностями программного обеспечения являются:

- создание различных лингвистических переменных с определяемыми функциями принадлежности для моделирования сложной радиоэлектронной обстановки с учетом специфики предметной области функционирования радиоэлектронных средств и процесса радиоэлектронного контроля;

- формирование базы нечетких правил вывода на естественном языке с возможностью оперативного изменения пользователем, в условиях высокой динамики изменения структуры и параметров контролируемых радиоэлектронных средств.

Предложен частный пример создания нечеткой системы вывода по оценке электромагнит-

ной доступности источников радиоизлучения, как одного из важных этапов обеспечения и ведения радиоэлектронного контроля.

### Литература

1. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. — М.: Физматлит. 2002. 254 с.
2. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // IEEE Transactions on Computers. Vol. 43. № 11. 1994. P. 1329–1333.
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Горячая линия-Телеком. 2006. 452 с.
4. Alcalá-Fdez J., Alonso J.M. A survey of fuzzy systems software: taxonomy, current research trends, and prospects, IEEE Trans. Fuzzy Syst. № 24. P. 40–56.
5. Уткин В.В., Ратушин А.П., Босый А.С., Коликов И.В. Стратифицированный подход к моделированию радиоэлектронной обстановки в интересах эффективного управления и применения сил и средств радиотехнического контроля // Труды Первой всероссийской научно-практической конференция по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения» («ИМСВН-2020»). — Санкт-Петербург. 25 ноября 2020 г. С. 239–245.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. — СПб: БХВ-Петербург. 2003. 736 с.
7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Штовба. — М: Горячая линия–Телеком. 2007. 288 с.
8. Avelar E., Castillo O., Soria J. Fuzzy logic controller with fuzzylab python library and the robot operating system for autonomous robot navigation: a practical approach, in: O. Castillo, P. Melin, J. Kacprzyk (Eds.), Intuitionistic and Type-2 Fuzzy Logic Enhancements in Neural and Optimization Algorithms: Theory and Applications, Springer, Cham, Switzerland. 2020. P. 355–369.
9. Wagner C., Miller S., Garibaldi J.M. A fuzzy toolbox for the R programming language, in 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems

(FUZZ-IEEE 2011), IEEE, Taipei, Taiwan. 2011. P. 1185–1192.

10. Soto-Hidalgo J.M., Alonso J.M., Acampora G., Alcalá-Fdez J., JFML: a java library to design fuzzy logic systems according to the IEEE, IEEE Access 6 (2018). P. 54952–54964.

11. Никольский Б.А. Основы радиоэлектронной борьбы: учебник / Б.А. Никольский. — Самара: Изд-во Самарского университета. 2018. 268 с.: ил.

12. Коликов И.В., Уткин В.В., Босый А.С. Проектирование динамической комплексной модели радиоэлектронной обстановки при разработке сценариев применения средств радиоэлектронного контроля // Военный инженер. 2021. № 1(19). С. 31–41.

13. Донсков Ю.Е., Ярыгин Ю.Н., Бывших Д.М. К вопросу о системе обоснования способов применения разнородных сил и средств радиоэлектронной борьбы против радиоразведки противника в армейских операциях // Военная мысль. 2019. № 8. С. 94–106.

14. Ястребова Н.Н. Построение экспертных систем на базе иерархического нечеткого ввода // Программные продукты и системы. 2007. № 4. С. 18–21.

### References

1. Kruglov V.V., Dli M.I. Intelligent information systems: computer support for fuzzy logic and fuzzy inference systems. — М.: Fizmatlit. 2002. 254 p.

2. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // IEEE Transactions on Computers. № 43. № 11. 1994. P. 1329–1333.

3. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. — М.: Goryachaya liniya-Telekom. 2006. 452 p.

4. Alcalá-Fdez J., Alonso J.M., A survey of fuzzy systems software: taxonomy, current research trends, and prospects, IEEE Trans. Fuzzy Syst. № 24. P. 40–56.

5. Utkin V.V., Ratushin A.P., Barefoot A.S., Kolikov I.V. A stratified approach to modeling the electronic situation in the interests of effective control and use of forces and means of radio control // Proceedings of the First All-Russian

Scientific and Practical Conference on Simulation and Its Application in the Military Sphere «Simulation of military systems, actions of troops and processes their support» («IMSVN-2020») (St. Petersburg, November 25, 2020). — SPb: Publishing house VA MTO — JSC TsTSS. 2020. P. 239–245.

6. Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH / A. Leonenkov. — SPb: BHV-Petersburg. 2003. 736 p.

7. Shtovba S.D. Design of fuzzy systems by means of MATLAB / S. Shtovba. — М: Hotline – Telecom. 2007. 288 p.

8. Avelar E., Castillo O., Soria J. Fuzzy logic controller with fuzzylab python library and the robot operating system for autonomous robot navigation: a practical approach, in: O. Castillo, P. Melin, J. Kacprzyk (Eds.), Intuitionistic and Type-2 Fuzzy Logic Enhancements in Neural and Optimization Algorithms: Theory and Applications, Springer, Cham, Switzerland. 2020. P. 355–369.

9. Wagner C., Miller S., Garibaldi J.M. A fuzzy toolbox for the R programming language, in 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011), IEEE, Taipei, Taiwan. 2011. P. 1185–1192.

10. Soto-Hidalgo J.M., Alonso J.M., Acampora G., Alcalá-Fdez J., JFML: a java library to design fuzzy logic systems according to the IEEE, IEEE Access 6 (2018). P. 54952–54964.

11. Nikolsky B.A. Fundamentals of electronic warfare: textbook / B.A. Nikolsky. — Samara: Publishing house of Samara University. 2018. 268 p.: ill

12. Kolikov I.V., Utkin V.V., Bosy A.S. Designing a dynamic complex model of the radio-electronic situation in the development of scenarios for the use of electronic control equipment // Military engineer. 2021. № 1(19). P. 31–41.

13. Donskov Yu.E., Yarygin Yu.N., formerly D.M. On the question of the substantiation system for the methods of using heterogeneous forces and means of electronic warfare against the enemy's radio intelligence in army operations // Military Thought. 2019. № 8. P. 94–106.

14. Yastrebova N.N. Construction of expert systems based on hierarchical fuzzy input // Software products and systems. 2007. № 4. P. 18–21.