

На правах рукописи

Ю.Б.

Щенёва Юлия Борисовна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДАнных ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Специальность 2.3.8. Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре «Электронные вычислительные машины».

Научный руководитель: **Пылькин Александр Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

Официальные оппоненты: **Гусева Анна Ивановна,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экономики и менеджмента в промышленности факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами НИЯУ МИФИ, г. Москва;

Шевнина Юлия Сергеевна,
доктор технических наук, доцент, профессор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

Защита состоится 30.06.2026 года в 12 ч 30 мин на заседании диссертационного совета 99.2.113.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1 (ауд.235)..

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте университета www.rsgeu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 99.2.113.02,
доктор технических наук, доцент



А.Н. Колесенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процессы управления в современных условиях носят ярко выраженный многокритериальный характер – решения принимаются с учётом множества показателей, которые зачастую конфликтуют между собой, имеют разнородную природу и динамически изменяются во времени.

Стремительный рост объёма разнородной информации, подлежащей обработке и анализу в различных областях знаний, является весомым аргументом в пользу выполнения разработок, предназначенных для решения сложных многокритериальных задач.

Процессы принятия решений (ППР), реализуемые через системы поддержки принятия решений (СППР), являются неотъемлемой частью любой информационной системы. Важным инструментом для исследования СППР является многокритериальный анализ данных. Задачи принятия решений с использованием методов многокритериальной оптимизации усложняются не столько количеством самих критериев, сколько учетом особенностей каждого критерия и разнообразием способов их выражения в зависимости от предметной области.

Современные системы поддержки принятия решений достаточно эффективно решают задачи по обработке и анализу данных из различных прикладных областей. Однако большинство существующих подходов к их проектированию демонстрируют ряд принципиальных ограничений. Во-первых, они не учитывают динамическую структуру критериев, что не соответствует реальным условиям. Во-вторых, известные методы часто полагаются на субъективные экспертные оценки при определении весов, что снижает объективность результатов. В-третьих, они недостаточно учитывают стохастический характер параметров. В-четвертых, игнорируется конфликтность целевых функций, исключая существование глобального оптимума по всем критериям одновременно.

Интенсивное развитие принципов использования вооружения и военной техники (ВВТ) предъявляет повышенные требования к функционированию системы восстановления ВВТ. Необходимость совершенствования системы восстановления определена Военной доктриной РФ. Однако эффективность проводимых мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту оказывается недостаточной вследствие ряда факторов:

- увеличения продолжительности времени ремонта;
- роста номенклатуры оборудования, применяемого при ремонте;
- усложнения ремонтной документации;
- низкой степени автоматизации процессов комплектования и планирования.

Анализ действующих требований и практики эксплуатации выявляет три системных недостатка.

Фрагментарность комплектования: существующие методики формируют комплекты для одного объекта, тогда как на практике одна мастерская должна быть готова восстановить несколько машин одновременно;

Отсутствие комплексной многокритериальной оценки: решения принимаются по одному-двум показателям (масса, габариты), без учёта совокупного влияния на техническую готовность, себестоимость, время ремонта и вероятность восстановления;

Зависимость от субъективных экспертных оценок, что снижает объективность принимаемых решений.

Существующие известные подходы не решают этих задач, поскольку:

- предполагают фиксированный набор критериев, что не соответствует реальным условиям эксплуатации (изменение номенклатуры агрегатов, обновление нормативов);
- не обеспечивают автоматизированную оптимизацию (не поддерживают обработку разнородных данных, игнорируют пропущенные значения, не учитывают стохастичность параметров).

Эти ограничения приводят к замедлению процесса принятия решений, снижению объективности результатов и эффективности управления информационным процессом, что противоречит требованиям оперативного принятия решений при восстановлении вооружения и военной техники в условиях изменяющейся тактической обстановки.

В результате возникает противоречие между уровнем автоматизации информационной поддержки процессов эксплуатации сложных технических комплексов и требованиями на современном этапе развития.

Вышеизложенное означает, что *актуальной задачей* является исследование методов и алгоритмов многокритериального анализа, интегрирующих подходы метрического моделирования, адаптивной оптимизации и автоматизированной обработки данных. Особенно важно, что разработанные методологические принципы могут быть успешно применены для решения прикладных технических задач, что подтверждает высокую практическую ценность исследования.

Степень разработанности темы исследования. Задача построения СППР с использованием методов многокритериального анализа данных решалась в работах зарубежных и отечественных исследователей: J. Fox, I. G. Naagsma, R. D. Johanns, E. Turban, J. E. Aronson, T. P. Liang, В. П. Осипова, Ф. Т. Алескерова, Г. С. Осипова, Д. А. Поспелова, Г. А. Голицына, И. И. Пятецкого-Шапира и др.

Разработкой многокритериальных методов принятия решений занимались A. Ishizaka, P. Nemery, M. Doumpos, E. Grigoroudis, С. В. Емельянов, Н. Н. Моисеев, Е. С. Вентцель, И. М. Соболев, Р. Б. Статников, Ю. Б. Гермейер, В. В. Подиновский, А. В. Демидовский, Б. В. Костров, А. Н. Пылькин и др.

Вопросы обработки количественных и качественных оценок в системах поддержки принятия решений рассматривались в трудах R. R. Yager, L. Zadeh, Z. Xu, F. Herrera, E. Herrera-Viedma, L. Martinez, Д. А. Поспелова, А. Н. Борисова, А. В. Алексеева и др.

Алгоритмы для решения задач кластерного анализа исследовались в работах R. A. Little, D. B. Rubin, K. Pal, J. M. Keller, J. C. Bezdek, T. Kohonen, P. В. Майера, К. В. Воронцова, А. В. Котова, Н. В. Красильникова, И. Д. Манделя, Л. А. Демидовой, А. И. Гусевой, Ю. С. Шевниной и др.

Анализ и исследование известных методов и алгоритмов построения систем поддержки принятия решений с использованием методов многокритериальной оптимизации показали, что большинство имеющихся подходов имеет ряд ограничений, которые значительно снижают эффективность принимаемых управленческих решений. Так, например, многие из них не способны адаптироваться к изменениям из-за сложного выбора комплексных критериев с учетом особенностей прикладной области исследования. Кроме того высокие вычислительные затраты и время, необходимое для принятия оптимальных решений, делают их низкоэффективными в условиях быстроизменяющихся реалий. Эти обстоятельства

требуют решения ряда **актуальных задач**, использующих многокритериальный анализ данных в системах поддержки принятия решений.

Вышеизложенное означает, что существует **научная задача** исследования методов и алгоритмов многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений, направленных на повышение эффективности информационного процесса функционирования сложных технических систем.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности систем поддержки принятия решений при управлении информационными процессами за счет разработки новых методов и вычислительно эффективных алгоритмов многокритериального анализа данных, обеспечивающих оперативный и обоснованный выбор решений в условиях динамичности, разнородности и стохастичности критериев.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **основные задачи**:

- провести анализ существующих подходов к многокритериальному анализу данных в СППР и выявить их недостатки в условиях динамической структуры критериев, их разнородной природы и стохастического характера параметров;
- сформулировать постановку многокритериальной задачи оптимизации с учётом конфликтности, разнородности и динамики критериев во времени;
- разработать методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающиеся от известных подходов возможностью обработки критериев в пространстве переменной размерности, обеспечивающие учет временной динамики, разнородности и стохастичности данных;
- разработать комплекс алгоритмов многокритериального анализа данных, реализующего автоматизацию принятия решений;
- разработать методику формирования специального комплекта оборудования для средств восстановления на основе методов многокритериальной оптимизации с учётом рисков и автоматизацией принятия решений;
- реализовать информационную систему, интегрирующую разработанные методы и алгоритмы, и продемонстрировать её применимость для технической системы.

Объектом исследования являются процессы принятия решений при управлении информационными процессами в условиях многокритериальности.

Предмет исследования – методы и алгоритмы многокритериального анализа данных на основе метрического моделирования в пространствах переменной размерности, обеспечивающие автоматизированную поддержку принятия решений.

Методы исследования. В диссертационной работе использован комплекс теоретических и прикладных методов. Методы системного анализа и теории систем применялись для формализации структуры информационных процессов и СППР. Для построения многокритериальных моделей и учёта стохастичности параметров использовались методы моделирования, математического анализа и теории вероятностей. Методы многокритериальной оптимизации (линейной свёртки, идеальной точки, последовательных уступок) необходимы для поиска компромиссных решений. При помощи теории графов и кластерного анализа выполнялась обработка связей между элементами, и определялись типовые траектории. Концептуальное и функциональное моделирование использовалось при разработке архитектуры СППР. Для реализации программной части – реляционное моделирование и проектирование баз данных. Оценка эффективности предложенных

решений относительно известных аналогов проводилась с использованием методов сравнительного анализа.

Научная новизна работы определяется следующими результатами, отличающимися научной новизной:

- разработаны методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающиеся от известных подходов возможностью корректной обработки критериев в пространстве переменной размерности, обеспечивающие учет временной динамики, разнородности и стохастичности данных. При практической апробации в задаче комплектации систем восстановления достигнут коэффициент технической готовности 95%, что на 10% превышает результаты при использовании известных методов;

- создан комплекс вычислительно эффективных алгоритмов, интегрирующий методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающийся от существующих реализаций автоматизацией принятия решений и поддержкой динамической структуры данных. Комплекс алгоритмов обеспечивает сокращение времени принятия оперативных решений на 25–30% по сравнению с известными аналогами;

- разработана методика формирования специального комплекта оборудования для систем восстановления на основе предложенных методов и алгоритмов, отличающаяся от известных подходов учетом многозадачности, анализом рисков, автоматизацией оптимизации. Методика обеспечивает повышение эффективности выполнения функций СППР на 20% за счёт отказа от субъективных экспертных оценок и использования статистических данных.

Практическая значимость и научная ценность результатов заключается в том, что:

- разработанные методы, комплекс вычислительно эффективных алгоритмов и методика позволяют автоматизировать принятие решений в условиях многокритериального выбора, динамики и неопределённости;

- созданная информационная система внедрена и успешно применяется в реальных условиях для оптимизации комплектации систем восстановления, обеспечивая повышение эффективности управления информационным процессом;

- результаты исследования могут быть масштабированы на другие типы сложных систем;

- на разработанные программные средства и базы данных получены свидетельства о государственной регистрации в реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности, охраняемой авторскими правами;

- результаты внедрены в деятельность Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища, ФГБУ «38 НИИИ БТВТ» Министерства Обороны РФ, а также в учебный процесс РГРТУ и ОГБПОУ «РТК».

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы» по направлениям исследований 6, 8, 16.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов подтверждаются корректным использованием математического аппарата, результатами компьютерного моделирования и экспериментальными исследованиями на реальных наборах данных технической системы, что подтверждается соответствующими документами о практическом использовании результатов диссертационного исследования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающиеся от известных подходов возможностью корректной обработки критериев в пространстве переменной размерности, обеспечивающие учет временной динамики, разнородности и стохастичности данных без субъективного задания весов. При практической апробации в задаче комплектации систем восстановления достигнут коэффициент технической готовности 95%, что на 10% превышает результаты при использовании известных методов.

2. Комплекс вычислительно эффективных алгоритмов, интегрирующий методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающийся от существующих реализаций автоматизацией принятия решений и поддержкой динамической структуры данных. Комплекс алгоритмов обеспечивает сокращение времени принятия оперативных решений на 25–30% по сравнению с известными аналогами.

3. Методика формирования специального комплекта оборудования для систем восстановления на основе предложенных методов и алгоритмов, отличающаяся от известных подходов учетом многозадачности, анализом рисков, автоматизацией оптимизации. Методика обеспечивает повышение эффективности выполнения функций СППР на 20% за счёт отказа от субъективных экспертных оценок и использования статистических данных.

Личный вклад автора. Выносимые на защиту основные положения и практические результаты разработаны и получены автором лично.

Внедрение результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования внедрены в разработки ФГБУ «38 НИИИ БТВТ» Министерства Обороны РФ, в Рязанском гвардейском высшем воздушно-десантном ордена Суворова дважды Краснознаменном командном училище им. генерала армии В. Ф. Маргелова (Министерства Обороны РФ) при подготовке и оснащении ремонтных мастерских, в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» при подготовке студентов, обучающихся по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика» и 09.03.04 «Программная инженерия», в ОГБПОУ «Рязанский технологический колледж». Разработанные программные средства зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (свидетельства о государственной регистрации – 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 свидетельства о государственной регистрации базы данных).

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на конференциях: XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX Всероссийских научно-технических конференциях студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании (НИТ-2020, НИТ-2021, НИТ-2022, НИТ-2023, НИТ-2024, НИТ-2025)» (г. Рязань, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025), II, VI, VIII Международных научно-технических форумах «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2019, СТНО-2023, СТНО-2025 РГРТУ (Рязань, 2019, 2023, 2025 гг.), II Национальной научно-практической конференции с международным участием «Перспективы цифровой трансформации образования», РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, 2022, II Международной научно-практической конференции «Проблемы естественных, математических и технических наук в контексте современного образования», ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, 2022, Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационный обмен в междисциплинарных

исследованиях II», Рязань: Академия ФСИН России, 2023, Всероссийском конкурсе профессионального мастерства «МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ (с международным участием): современный образовательный процесс в Российской Федерации, внедрение в практику работы педагогов инновационных учебных технологий, методик, инструментов и воспитательных систем», 1 место, Чебоксары, 2023, 8th Computational Methods in Systems and Software 2024 System Design in Software Engineering - Proceedings of 8th Computational Methods in Systems and Software 2024.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 34 печатные работы, в том числе: 5 статей в научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций; 1 публикация, индексируемая в международных реферативных базах Web of Science и Scopus; 22 статьи и тезиса докладов внутривузовских, всероссийских и международных конференций, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 152 страницы, работа содержит 35 рисунков и 12 таблиц. Список использованных источников включает 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели. Определены объект и предмет исследования, перечислены методы, использованные в работе. Приведены результаты исследования, отражающие его научную новизну и практическую значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту. Представлены сведения о внедрении, апробации и публикации результатов исследования, структура и объем работы.

В первой главе выполнен анализ современного состояния теории и практики многокритериального анализа данных в системах поддержки принятия решений. Рассмотрены основные подходы к постановке и решению задач многокритериальной оптимизации. Описаны известные методы многокритериального анализа данных: скаляризации, идеальной точки, анализа иерархий (АНП), Elimination Et Choix Traduisant la Realite (ELECTRE), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), а также интерактивные и траекторные модели. Особое внимание уделено моделям, основанным на представлении информационных процессов в многомерных метрических пространствах.

Показано, что процессы принятия решений в условиях высокой размерности, неоднородности и противоречивости критериев сопряжены со значительными вычислительными и временными затратами, что снижает оперативность и качество управленческих решений. При этом выявлено, что результаты моделирования существенно зависят от выбора метрики: применение одинаковых методов к одному и тому же набору данных в различных метрических пространствах может приводить к противоречивым выводам, что создаёт проблему несогласованности решений и снижает надёжность рекомендаций.

Проанализированы особенности применения систем поддержки принятия решений в различных предметных областях – от технических систем до социальных процессов. Установлено, что существующие подходы недостаточно учитывают динамическую природу критериев и стохастический характер параметров, а также

испытывают трудности при обработке разнородных, неполных данных и изменяющейся размерности пространства решений.

На основе обзора научной литературы выявлены основные недостатки известных подходов: слабая адаптивность к изменению структуры критериев, высокая зависимость от субъективных экспертных оценок, отсутствие единой методологической основы, применимой к прикладным задачам технической сферы. Это обосновало необходимость разработки новых методов и алгоритмов многокритериального анализа данных, способных обеспечивать выбор решений в условиях многокритериальности, эффективно обрабатывать разнотипные, динамические и стохастические данные.

Проведенный анализ современных методов многокритериального анализа данных в системах поддержки принятия решений показал, что современные решения не обеспечивают достаточной гибкости при работе с динамически меняющейся размерностью критериев, стохастическими параметрами и разнородными данными. Выявленные недостатки – низкая адаптивность, недостаточный учёт стохастической природы данных и динамическое изменение размерности критериев – обусловили необходимость разработки новых методов и алгоритмов многокритериального анализа, способных эффективно работать с разнородными данными.

В результате анализа, представленного в первой главе, заложена теоретическая основа для разработки методов и алгоритмов многокритериальной оптимизации, основанных на уточнённом и расширенном научно-методическом аппарате.

Во **второй главе** выполнена постановка задачи многокритериального анализа данных и разработаны методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки на основе представления информационных процессов в виде траекторий в многомерных метрических пространствах. В постановке задачи учитывается динамическая структура критериев, их разнородная природа и стохастический характер параметров. На основе разработанных методов создан комплекс вычислительно эффективных алгоритмов многокритериальной оптимизации, поддерживающий изменение размерности пространства, выбор метрики и интерактивную корректировку весов.

Задача многокритериального анализа данных основана на представлении информационного процесса как траектории в n – мерном метрическом пространстве. Показано, что эффективность управления информационным процессом может быть оценена единообразно с использованием системы частных показателей, нормализованных и интерпретируемых как координаты точек в многомерном пространстве.

Информационный процесс, лежащий в основе принятия управленческих решений, формализован как совокупность частных показателей $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$, которые отражают динамику его изменения и задают размерность метрического пространства, в котором осуществляется моделирование. Эти показатели выступают критериями эффективности в конкретной предметной области, а их количество определяется логикой поставленной задачи и спецификой анализируемого процесса.

Учитывая, что исходные значения критериев могут иметь различную природу, масштаб и размерность, перед построением модели они подвергаются нормализации, обеспечивающей сопоставимость всех показателей. Для количественных показателей используется линейное преобразование, отображающее значения на отрезок $[0;1]$ по формуле:

$$w_i = \frac{w_i^* - w_{i\min}^*}{w_{i\max}^* - w_{i\min}^*}, \quad (1)$$

где w_i^* — текущее значение i -го показателя, $w_{i\max}^*$, $w_{i\min}^*$ — его максимальное и минимальное значения в выборке соответственно. Для качественных критериев применяется ранговая нормализация, для логических критериев используется бинарная нормализация. Такой комплексный подход позволяет корректно агрегировать разнородные данные в едином метрическом пространстве и обеспечивает объективность последующего многокритериального анализа.

Эффективность управления процессом оценивается при помощи обобщенного показателя, интерпретируемого как расстояние между точками в n -мерном метрическом пространстве. Представлены два принципиально различных подхода:

- 1) нахождение расстояния от исследуемого до «идеального» объекта $w^+ = (1, \dots, 1)$ — с максимальными характеристиками по всем критериям;
- 2) нахождение расстояния от исследуемого до «неидеального» объекта $w^- = (0, \dots, 0)$ — с минимальными характеристиками по всем критериям.

В первом случае эффективность управления информационным процессом повышается при уменьшении расстояния до идеальной траектории, во втором — при увеличении расстояния до неидеальной траектории. Такой подход позволяет адаптировать модель под особенности конкретной прикладной задачи.

Особенностью информационных процессов является их динамическая природа — состав и число критериев могут изменяться в ходе функционирования технической системы. Это затрудняет применение традиционных статических методов моделирования и требует использования адаптивных метрических подходов.

Для учета временной эволюции система моделирует объект в виде траектории $T = w(t_1), w(t_2), \dots, w(t_k)$, что позволяет оценивать не только его текущее состояние, но и анализировать динамику изменения эффективности.

Разработанный механизм адаптации к изменению размерности пространства решений корректно обрабатывает ситуации, когда число критериев изменяется во времени: при появлении нового показателя метрическое пространство расширяется с заданием начального значения (например, 0 или среднее по группе аналогов). При сравнении объектов с разным числом критериев используется проекция на общее подпространство. Это особенно важно в задачах с динамической структурой данных.

Общая постановка задачи многокритериального принятия решений заключается в оценке конечного множества альтернатив $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ по совокупности показателей, характеризующих эффективность управления информационным процессом. При этом учитываются три ключевые особенности:

1) *динамическая структура критериев*: количество и состав частных показателей $w_i(t)$ могут изменяться во времени (например, при обновлении номенклатуры оборудования в технической системе), что приводит к переменной размерности пространства решений $n(t)$;

2) *разнородная природа критериев* — количественные, качественные, субъективные и объективные показатели, требующие предварительной нормализации и приведения к сопоставимому виду;

3) *стохастический характер параметров* — критерии могут задаваться как случайные величины или вероятностные распределения, что требует учёта неопределённости и рисков при оценке альтернатив.

Множество возможных исходов задается вектором значений целевых функций $J(w)=(J_1(w), J_2(w), \dots, J_m(w))$, где каждая компонента оценивает качество решения по соответствующему критерию. Между альтернативой $w_i \in W$ и результатом $J_k \in J$ существует причинно-следственная связь, описываемая отображением: $\varphi: W \xrightarrow{\varphi} J$, $J_k = \varphi(w_i) \in J$. Необходимо определить оптимальный вариант, который обеспечивает компромис между конфликтующими целями и оптимизирует обобщённый показатель эффективности в условиях динамически изменяющейся структуры критериев, их разнородной природы и стохастической неопределенности. Итоговая оценка качества решения выражается через суперпозицию: $J_i(w) = f_i(\varphi(W))$, $i = \overline{1, m}$, что задает векторное отображение: $J: w_i \rightarrow R^n$, $J = (J_1, \dots, J_m)$, $J(W) = F \subset R^n$.

Задача принятия решений формулируется как поиск нормализованного вектора: $w(t) = (w_1'(t), w_2'(t), \dots, w_{n(t)}'(t)) \in [0, 1]^{n(t)}$, который минимизирует или максимизирует векторный функционал $J(w(t)) = (J_1(w(t)), J_2(w(t)), \dots, J_m(w(t)))$, где каждая компонента J_k может быть детерминистской, интервальной или стохастической функцией, а нормализованные показатели $w_i'(t)$ получены из исходных данных с учётом их природы.

В результате получена **многокритериальная задача принятия решений** (задача многокритериальной оптимизации) следующего вида:

$$J_i(w) \rightarrow \max_{w_i \in W}, i = \overline{1, m}, W \subset R^n \text{ или } J_i(w) \rightarrow \min_{w_i \in W}, i = \overline{1, m}, W \subset R^n, \text{ где}$$

«*max*» или «*min*» понимается в смысле Парето-оптимальности, поскольку в условиях конфликта критериев глобальный максимум (или минимум) по всем показателям одновременно, как правило, недостижим.

Таким образом, предложенная постановка задачи интегрирует динамическую структуру критериев, обработку разнородных и стохастических данных и устойчивость к неопределенности, что обеспечивает её применимость в реальных прикладных условиях, где традиционные статические модели оказываются недостаточными.

Постановка задачи объединяет два ключевых принципа: **идеальной траектории** (динамическое моделирование) и **метод двойной эталонной оценки** (баланс между идеалом и неидеалом в каждый момент времени).

Разработанный метод идеальной траектории является развитием известного метода идеальной точки и предназначен для решения многокритериальных задач в условиях динамического развития объекта во времени. В отличие от классического метода, где альтернатива оценивается как статическая точка в n -мерном метрическом пространстве, в предложенном подходе альтернатива рассматривается в виде траектории: $T = \{w(t_1), w(t_2), \dots, w(t_k)\}$, где $w(t_i)$ – нормализованный вектор частных показателей в момент времени t_i .

Идеальная траектория T^+ формируется как последовательность «идеальных» состояний: $T^+ = \{w^+(t_1), w^+(t_2), \dots, w^+(t_k)\}$, где каждый вектор $w^+(t_i) = (1, 1, \dots, 1)$ содержит максимально возможные значения по всем критериям (при максимизации) или минимальные (при минимизации), приведённые к шкале $[0; 1]$.

Обобщённый показатель эффективности определяется как среднее расстояние между траекториями в выбранной метрике: $D(T) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k d(w(t_i), w^+(t_i))$, где, например, в

случае взвешенной евклидовой метрики: $d(w(t_i), w^+(t_i)) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n(t_i)} c_j (w_j(t_i) - 1)^2}$.

Основные отличия предложенного метода идеальной траектории от известного метода идеальной точки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Ключевые отличия метода идеальной траектории от метода идеальной точки

Метод идеальной точки	Разработанный метод идеальной траектории
Оценивается статическое состояние (точка)	Оценивается динамический процесс (траектория)
Количество критериев фиксировано	Количество критериев меняется во времени
Пропущенные данные – ошибка	Пропущенные значения обрабатываются в зависимости от типа пропуска
Однократная оценка	Интегральная оценка по времени

В технической системе метод идеальной траектории позволяет отслеживать изменение коэффициента технической готовности на различных этапах эксплуатации систем восстановления – от учений до военных действий, учитывая время ремонта, массу и стоимость оборудования, а также вероятность восстановления техники.

Разработанный метод двойной эталонной оценки предназначен для многокритериального ранжирования альтернатив и основан на учете двух эталонов: приближения к идеальному решению $w^+(t) = (1, 1, \dots, 1)$ и удаления от неидеального решения $w^-(t) = (0, 0, \dots, 0)$. Обобщённый показатель эффективности альтернативы $w(t)$ вычисляется по формуле: $D(w(t)) = \alpha \cdot d(w(t), w^+) + (1 - \alpha) \cdot (d_{max} - d(w(t), w^-))$, где $\alpha \in [0, 1]$ – настраиваемый параметр, определяющий стратегию оценки (ближе к идеалу/дальше от неидеала). Такой подход обеспечивает адаптацию к специфике конкретной задачи.

Предложенные методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки устраняют недостаток известных подходов – зависимость от единственной точки отсчёта. За счет отдельного учета эталонов достигается **повышенная устойчивость к зашумленности данных, объективность** (благодаря отказу от экспертно задаваемых весов) и **интерпретируемость** результатов. Экспериментальная апробация на реальных наборах данных подтвердила эффективность предложенного подхода: применение разработанной СППР позволило **повысить коэффициент технической готовности до 95 % вместо 85 %**, достигаемых с использованием известных методов.

Синтез этих методов обеспечивает комплексную, надежную и интерпретируемую оценку в условиях многокритериальности, что подтверждает их практическую ценность для управления техническими системами.

В **третьей главе** разработан и программно реализован **комплекс вычислительно эффективных алгоритмов**, интегрирующий методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки в единую вычислительную процедуру. Комплекс отличается от существующих реализаций автоматизацией принятия решений и поддержкой динамической структуры данных. Он обеспечивает поддержку принятия решений в условиях разнородности и стохастичности данных.

Управляющий алгоритм разработанного **комплекса вычислительно эффективных алгоритмов многокритериального анализа данных** состоит из следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Сбор и предварительная обработка данных.

1.1. Нормализация разнородных критериев.

1.2. Обработка пропущенных значений.

1.3. Определение весов (экспертно или статистически).

Шаг 2. Формирование эталонных объектов. Построение идеальной (с максимальными характеристиками по всем критериям) и неидеальной траектории (с минимальными характеристиками по всем критериям).

Шаг 3. Выбор метрики. Задается автоматически (по типу данных) или вручную пользователем.

Шаг 4. Вычисление обобщенного показателя эффективности.

4.1. Расчет расстояния от исследуемого объекта до идеальной траектории.

4.2. Расчет расстояния от исследуемого объекта до неидеальной траектории.

4.3. Формирование обобщенного показателя эффективности.

Шаг 5. Ранжирование и визуализация.

5.1. Построение траекторий исследуемых объектов.

5.2. Исключение функциональной избыточности элементов.

5.3. Генерация радарных диаграмм для комплексной оценки баланса критериев.

Шаг 6. Интерактивная корректировка.

6.1. Изменение весов.

6.2. Добавление/исключение критериев без перезапуска вычислений.

Шаг 7. Многокритериальная оптимизация

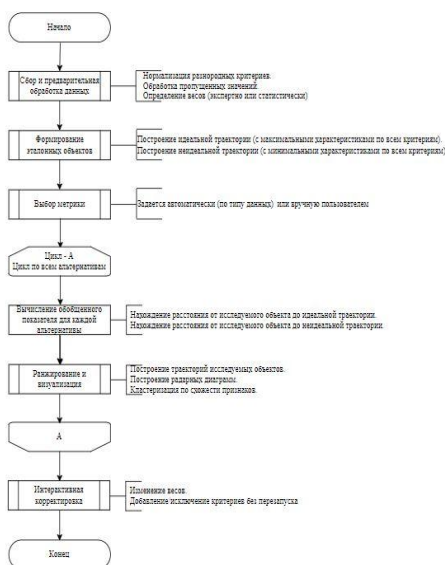
7.1. Метод покоординатного поиска экстремума целевой функции с адаптивным шагом.

7.2. Метод идеальной траектории.

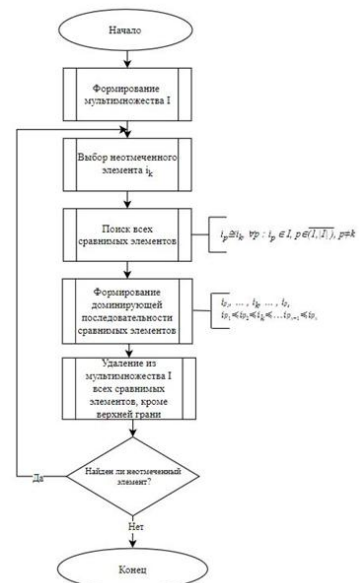
7.3. Метод двойной эталонной оценки.

7.4. Оценка эффективности СППР.

Комплекс алгоритмов реализован в виде модульной процедуры, не зависящей от предметной области. Конфигурация под конкретную задачу осуществляется через параметризацию входных данных и метрик. Укрупненная схема управляющего алгоритма представлена на рисунке 1(а).



а)



б)

Рисунок 1 – Укрупненные схемы алгоритмов: (а) – управляющего алгоритма многокритериального анализа данных, (б) – алгоритма исключения функциональной избыточности элементов

Экспериментальное сравнение разработанного комплекса алгоритмов многокритериального анализа данных с результатами, полученными с помощью известных алгоритмов, подтвердило его преимущество. В отличие от известных подходов, которые предполагают статическую структуру критериев и ручную настройку весов, предложенный комплекс обеспечивает:

- адаптивность к изменению размерности пространства решений;
- автоматическую нормализацию разнородных показателей;
- выбор метрики в зависимости от характера данных;
- интегрированную процедуру исключения функциональной избыточности.

В результате **время формирования рекомендаций и принятия оперативных решений сократилось на 25–30%**, а **точность достигла 98,5%** (92,0–94,3% у аналогов). Улучшение достигнуто за счёт:

- устранения избыточных вычислений при динамическом наборе критериев;
- автоматизации этапов нормализации, агрегирования и ранжирования;
- использования эффективных стратегий поиска экстремума (покоординатный спуск с адаптивным шагом) на начальных этапах оптимизации.

На основе комплекса алгоритмов спроектирована и реализована система поддержки принятия решений, архитектура которой включает четыре взаимосвязанных модуля. Модуль управления данными обеспечивает приём, нормализацию и предварительную обработку разнородной информации, включая корректную обработку структурных и случайных пропусков. Модуль моделирования реализует модель на основе анализа траекторий в многомерных метрических пространствах и процедуру исключения избыточности элементов через анализ доминирования строк. Модуль многокритериальной оптимизации реализует модифицированный алгоритм покоординатного поиска экстремума, а также алгоритмы разработанных методов идеальной траектории и двойной эталонной оценки. Наглядное представление результатов в виде траекторий развития альтернатив и радарных диаграмм обеспечивает модуль визуализации.

Все модули взаимодействуют через единый API, а исходные данные и параметры конфигурации централизованно хранятся в реляционной базе данных на платформе MS SQL. Особенностью архитектуры является поддержка возобновления вычислений с прерванного места и возможность внешнего контроля сходимости, что особенно важно при работе с итерационными алгоритмами оптимизации.

Программная реализация выполнена на языке Python 3.10 с использованием библиотек научных вычислений: NumPy, SciPy – для научных расчетов, scikit-learn – для задач кластеризации, Plotly и Matplotlib – для визуализации, Pandas – для обработки и анализа данных. В качестве СУБД применяются SQLite для локального развёртывания и MS SQL для серверной версии. Результаты практического применения СППР при формировании комплекта технического оборудования для средств восстановления ВДВ подтверждают её практическую значимость.

Одной из основных функций модуля управления данными является адаптивная обработка пропущенных значений с учётом их типа – структурного (обусловленного этапом жизненного цикла объекта) или случайного (вызванного сбоем или пропуском измерения). Для реализации этой функции разработан специализированный алгоритм, который корректно учитывает динамику изменения структуры критериев и обеспечивает нормализацию данных только по валидным компонентам. В совокупности с другими компонентами системы он способствует повышению обобщённого показателя эффективности по сравнению с известными подходами.

Разработан алгоритм обработки пропущенных значений в многокритериальной модели на основе анализа траекторий в многомерных метрических пространствах.

Шаг 1. Идентификация пропущенных компонент.

Для каждого значения $j=1, \dots, n$:

Если w_j отсутствует, определить тип пропуска:

- структурный: компонент не введён в систему на момент t_i (например, параметр технической системы отсутствует в спецификации);
- случайный: компонент должен быть, но значение не зафиксировано (например, компонент технической системы вышел из строя).

Шаг 2. Обработка структурных пропусков. Исключение компонент со структурным пропуском из дальнейших расчетов в момент времени t_i .

Создание множества индексов валидных компонент:
 $Val(t_i) = \{j : \forall j \exists w_j \neq \text{структурный пропуск}\},$

Шаг 3. Обработка случайных пропусков.

Для каждого $j \notin Val(t_i)$, где пропуск – случайный:

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{|G|} \sum_{k \in G} w_j^{(k)}$$

3.1. Вычислить среднее значение по группе аналогов G :

3.2. Присвоить: $w_j = \tilde{w}_j$.

3.3. Добавить индекс j к множеству валидных компонент $Val(t_i)$.

Шаг 4. Нормализация данных.

Для всех $j \in Val(t_i)$ выполнить нормализацию значения к шкале $[0,1]$. При этом минимальное значение $w_{j_{\min}}$ и максимальное значение $w_{j_{\max}}$ определить по непропущенным данным в момент t_i по группе G .

Шаг 5. Формирование результата.

Сформировать вектор $\tilde{w}(t_i)$, включающий компоненты с индексами из множества валидных компонент $Val(t_i)$: $\tilde{w}(t_i) = (\tilde{w}_j)_{j \in Val(t_i)}$. Размерность результирующего вектора равна мощности этого множества: $n(t_i) = |Val(t_i)|$.

Полученный вектор $\tilde{w}(t_i)$ готов для вычисления расстояния до идеальной траектории в заданной метрике.

Таким образом, в исследовании впервые предложена интеграция метрического подхода к многокритериальному анализу данных с механизмом адаптивной обработки пропущенных данных, в зависимости от типа пропуска (структурные или случайные). Это позволяет корректно моделировать информационные процессы в условиях динамического изменения структуры критериев, что особенно актуально при обновлении номенклатуры технического оборудования в системах восстановления ВВТ.

В модуле моделирования реализован алгоритм исключения функциональной избыточности элементов на основе анализа доминирования строк в матрице ресурсов. Суть алгоритма: из исходного набора элементов выделяется минимальное подмножество, сохраняющее полное покрытие всего спектра ремонтных работ. Укрупнённая схема алгоритма представлена на рисунке 1 (б).

Модуль многокритериальной оптимизации предназначен для поиска рациональных решений и реализует комплексный подход. В рамках модуля применен модифицированный метод покоординатного поиска экстремума – итерационный

алгоритм оптимизации нулевого порядка, не требующий вычисления градиента или производных целевой функции. Его выбор обусловлен устойчивостью к некорректным или неполным данным, простотой программной реализации и способностью обеспечивать надёжное начальное приближение даже в условиях сложной, многомерной структуры пространства решений.

Метод основан на последовательной оптимизации целевой функции (функционала) по одной координате за итерацию, с фиксированными значениями остальных компонент вектора альтернатив $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$. Направление и величина шага по каждой координате изменяются в зависимости от поведения функционала.

Разработанный алгоритм метода покоординатного поиска экстремума с адаптивным шагом реализован следующим образом:

Шаг 1. Инициализация: выбор начальной точки $W^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ из множества допустимых альтернатив и определение начального шага $h_0 > 0$.

Шаг 2. Вычисление значения целевой функции в начальной точке: $F^{(0)} = J(W^{(0)})$.

Шаг 3. Для каждой координаты $k=1, 2, \dots, n$ выполняются следующие действия:

3.1. Устанавливается текущий шаг $h_k = h_0$.

3.2. Формируется пробная точка W^k , в которой k -я компонента увеличена на величину шага h_k : $w_k = w_k + h_k$.

3.3. Вычисляется значение функционала в пробной точке: $F' = J(W')$.

3.4. Если $F' \leq F$ (при решении задачи минимизации), то шаг увеличивается втрое ($h_k := 3h_k$), значение функционала обновляется ($F := F'$), и поиск продолжается в том же направлении.

3.5. В противном случае направление поиска инвертируется: $w_k := w_k - h_k$, шаг уменьшается вдвое ($h_k := -0.5h_k$), и алгоритм продолжает работу в новом направлении.

Шаг 4. Завершение цикла. Процесс последовательного перебора координат повторяется до завершения полного цикла по всем компонентам вектора W .

Шаг 5. Алгоритм завершает работу после выполнения заранее заданного числа N вычислений функционала $J(W)$.

Важной особенностью предложенной модификации алгоритма является отсутствие внутренних критериев сходимости: процесс завершается по достижении заданного числа вычислений функционала и может быть возобновлён с сохранённого состояния. Это обеспечивает гибкость управления глубиной поиска и возможность промежуточного анализа результатов. Алгоритм не предполагает дифференцируемости целевой функции, что позволяет применять его к разнородным, дискретным и зашумленным данным, характерным как для технических, так и для других прикладных систем.

Таким образом, разработан модифицированный алгоритм покоординатного поиска экстремума с адаптивным управлением шагом, который поддерживает возможность возобновления вычислений с прерванного места, что обеспечивает высокую степень интеграции алгоритма в управляющий цикл СППР.

Разработанный алгоритм оценки эффективности на основе разработанного метода идеальной траектории состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Формирование идеальной и неидеальной траекторий.

Для каждого момента времени $t_i \in T$:

1.1. Определить размерность пространства критериев $n(t_i)$.

1.2. Для каждого критерия $j=1, 2, \dots, n(t_i)$:

1.2.1. Если $J_j \rightarrow \min$: $w_j^+(t_i) = \min_{x \in X(t_i)} J_j(x)$, $w_j^-(t_i) = \max_{x \in X(t_i)} J_j(x)$.

1.2.2. Если $J_j \rightarrow \max$: $w_j^+(t_i) = \max_{x \in X(t_i)} J_j(x)$, $w_j^-(t_i) = \min_{x \in X(t_i)} J_j(x)$.

1.3. Сформировать векторы: $w^+(t_i) = (w_1^+(t_1), w_2^+(t_2), \dots, w_{n(t_i)}^+(t_i))$ и $w^-(t_i) = (w_1^-(t_1), w_2^-(t_2), \dots, w_{n(t_i)}^-(t_i))$.

1.4. Добавить в траектории: $T^+ = T^+ \cup \{w^+(t_i)\}$ и $T^- = T^- \cup \{w^-(t_i)\}$.

Шаг 2. Обработка пропущенных значений

2.1. Определить тип каждого пропуска.

2.2. Сформировать множество валидных индексов.

2.3. Выполнить нормализацию только по валидным компонентам.

Шаг 3. Вычисление обобщённого показателя эффективности.

Для каждой альтернативы x с траекторией $T_x = \{w_x(t_1), w_x(t_2), \dots, w_x(t_k)\}$:

3.1. Для каждого t_i вычислить расстояние до идеала в выбранной метрике, например взвешенной евклидовой: $d_i = \sqrt{\sum_{j \in \text{Val}(t_i)} c_j (w_{x,j}(t_i) - w_j^+(t_i))^2}$

3.2. Вычислить среднее расстояние: $D(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k d_i$,

Шаг 4. Выбор оптимального решения.

4.1. Найти альтернативу x^* , минимизирующую $D(x)$: $x^* = \min_{x \in X} D(x)$.

4.2. Вернуть ее траекторию $T^* = T_{x^*}$.

Основными особенностями алгоритма являются: учёт динамической структуры критериев, корректная обработка структурных пропусков, отказ от экспертных оценок в пользу статистических данных. В исследовании алгоритм успешно адаптирован для задач технической системы (минимизация времени, массы, объема и стоимости при максимизации вероятности восстановления техники).

Проведено численное моделирование на синтетических и реальных наборах данных: сформированы матрицы распределения элементов, построены базисный минор и минимальная матрица ресурсов, реализовано построение траекторий в многомерном метрическом пространстве.

Выполнена оценка корректности и вычислительной эффективности предложенных алгоритмов. Экспериментальные результаты подтвердили, что разработанный комплекс алгоритмов обеспечивает **сокращение времени обработки данных** на 25–30 % по сравнению с известными подходами (таблица 2). При этом достигнуто не только ускорение расчетов, **но и повышение качества полученных решений**: точность составила 98,5 %, что на 6–7 % превышает результаты аналогов. Особое значение имеет устойчивость к возмущениям данных: при добавлении шума изменение рангов альтернатив не превысило 1,4 позиции, тогда как у АНР около 4,7, а у TOPSIS – 5,1.

Таблица 2 – Результаты сравнительного анализа комплекса алгоритмов с известными подходами

Алгоритм	Время (с)	Точность (%)	Устойчивость (Δ)
Разработанный комплекс алгоритмов	2,1	98,5	1,4
АНР	3,0	92,0	4,7
TOPSIS	2,8	94,3	5,1

Таким образом, создан комплекс вычислительно эффективных алгоритмов, интегрирующий методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающийся от существующих реализаций автоматизацией принятия решений и поддержкой динамической структуры данных, что подтверждается в экспериментальной апробации, которая описана в четвертой главе диссертационного исследования.

Разработана методика формирования специального комплекта оборудования для систем восстановления на основе предложенных методов и алгоритмов, отличающаяся от известных подходов учетом многозадачности, анализом рисков, автоматизацией оптимизации. Методика основана на геометрической интерпретации информационного процесса как траектории в многомерном метрическом пространстве, где каждая альтернатива представляется нормализованным вектором частных показателей, а эффективность оценивается как расстояние до идеальной траектории. В отличие от известных подходов, основанных на частоте применения элементов и экспертных оценках, предложенная методика решает задачу многокритериальной оптимизации с применением комплексного подхода (совокупность методов покоординатного поиска, идеальной точки, идеальной траектории, двойной эталонной оценки), использует статистические данные, автоматически исключает избыточность через анализ доминирования строк, отказывается от субъективных экспертных суждений.

Основные этапы предлагаемой методики:

1. Параметризация модели и подготовка исходных данных.

1.1. Активация автоматической настройки конфигурации в зависимости от тактической задачи.

1.1.1. «надежность/покрытие», при работе в условиях ограниченной доступности ресурсов (полевые условия, высокий риск отказа).

1.1.2. «баланс/динамика», при планировании долгосрочного использования (стационарные пункты, модернизация).

1.2. Выбор метрики.

1.2.1. Метрика Чебышева с фокусом на надежность: выявляет «слабые места» (минимальное покрытие агрегата).

1.2.2. Евклидова метрика с фокусом на баланс: учитывает совокупное влияние всех критериев.

1.3. Построение эталонов.

1.3.1. Идеальный эталон: $w^+ = (1, 1, \dots, 1)$ – все агрегаты полностью покрыты.

1.3.2. Неидеальный эталон: $w^- = (0, 0, \dots, 0)$ – ни один агрегат не обслуживается.

1.4. Обработка пропусков при инвентаризации.

1.4.1. Импутация по функциональной зависимости.

1.4.2. Интерполяция по временным рядам (для динамических показателей, например, изменение нормативов по месяцам).

1.5. Систематизация и нормализация исходных данных.

1.5.1. Формирование матрицы значений.

1.5.2 Нормализация разнородных критериев к шкале $[0;1]$: количественные (масса, время, объем, стоимость ремонта), качественные (совместимость) – по частоте применения, бинарные (наличие/отсутствие).

1.5.3. Кластеризация по схожести признаков (агрегаты с близкими техническими характеристиками объединяются в группы для упрощения анализа).

2. Анализ и исключение избыточности.

2.1. Формирование множества операций ремонта для каждого агрегата (по ремонтной документации и ТТЗ).

2.2. Формирование множества оборудования, примененного для каждой операции.

2.3. Определение технологической значимости оборудования как частоты его участия в операциях по всем агрегатам.

2.4. Исключение избыточности через анализ доминирования строк в матрице ресурсов.

2.5. Формирование минимальной матрицы ресурсов без дублирующих и доминируемых элементов.

3. Многокритериальная оценка и оптимизация.

3.1. Вычисление пользовательских свойств комплекта:

- номенклатура (число позиций),
- количество (ед.),
- масса (кг),
- объём (л),
- время ремонта (ч),
- себестоимость (руб.).

3.2. Проверка соответствия требованиям (габариты, вес, бюджет). При несоответствии – переход к оптимизации.

3.3. Многокритериальная оптимизация на основе комбинированного подхода:

3.3.1. Метод покоординатного поиска экстремума для начального приближения.

3.3.2. Метод последовательных уступок для баланса критериев.

3.3.3. Метод идеальной точки для общего ранжирования.

3.3.4. Метод идеальной траектории при динамическом изменении комплектов (например, по этапам учений).

3.3.5. Метод двойной эталонной оценки для финальной оценки с учетом динамики и рисков.

3.4. Ранжирование инструментов по показателю универсальности

Правило ранжирования: ранг инструмента тем выше, чем выше его универсальность и частота применения в критических операциях. Ранг зависит не только от самой значимости, но и от состава объектов и решаемых технических задач.

4. Генерация оптимального решения. Автоматическое формирование рекомендаций.

4.1. Выбор комплекта с максимальным обобщенным показателем эффективности при соблюдении ограничений.

4.2. Автоматическая генерация рекомендаций.

4.3. Вывод отчёта: список комплекта, его свойства, сравнение с базовым вариантом, оценка рисков.

Эксперимент показал, что применение новой методики увеличивает **эффективность функционирования СППР на 20 %** по сравнению со стандартной реализацией за счет учета многозадачности, отказа от субъективных экспертных оценок и использования статистических данных.

Методика успешно адаптирована для технических систем при формировании комплекта технического оборудования для средств восстановления ВДВ, что подтверждает её практическую значимость.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования и практического применения разработанной системы поддержки принятия решений для технической системы – оптимизация комплектации средств восстановления Воздушно-десантных войск;

Цель эксперимента – проверка эффективности, точности, оперативности и адаптивности СППР в реальных условиях. Эксперимент проводился в три этапа.

На первом этапе сформированы полная генеральная совокупность на основе реальной таблицы распределения технического оборудования (выборка из 1029 инструментов). Спроектированы и реализованы модели данных, интегрированные с реляционными базами данных.

На втором этапе осуществлена апробация СППР: применены алгоритмы обработки разнородной информации, включая обработку структурных и случайных пропусков, исключение избыточности элементов, покоординатный поиск с адаптивным шагом, метод идеальной траектории и двойной эталонной оценки. Реализован интерфейс, обеспечивающий выбор предметной области, настройку весов и метрик, расчёт и визуализацию результатов (рисунок 2).

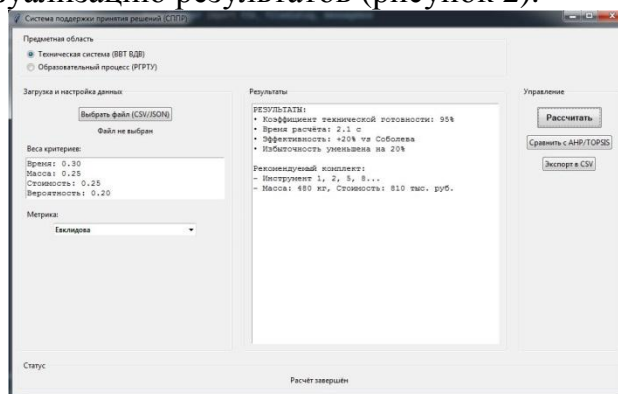


Рисунок 2 – Интерфейс СППР

Выбор количества и содержания критериев осуществлялся с учётом специфики прикладной области и требований к адекватности модели. Зона возможных значений обобщенного показателя относительно неидеальной траектории и анализ данных по первым трем показателям представлены на рисунке 3.

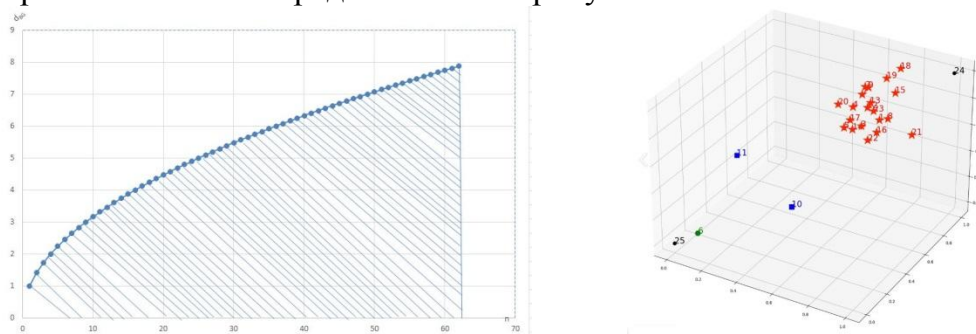


Рисунок 3 – Анализ данных на начальном этапе эксперимента

В модуле моделирования реализована модель на основе траекторий в многомерных метрических пространствах. Расчет обобщенного показателя эффективности в заданной метрике позволил построить траектории развития объектов и визуализировать их динамику относительно эталонных решений (рисунок 4).

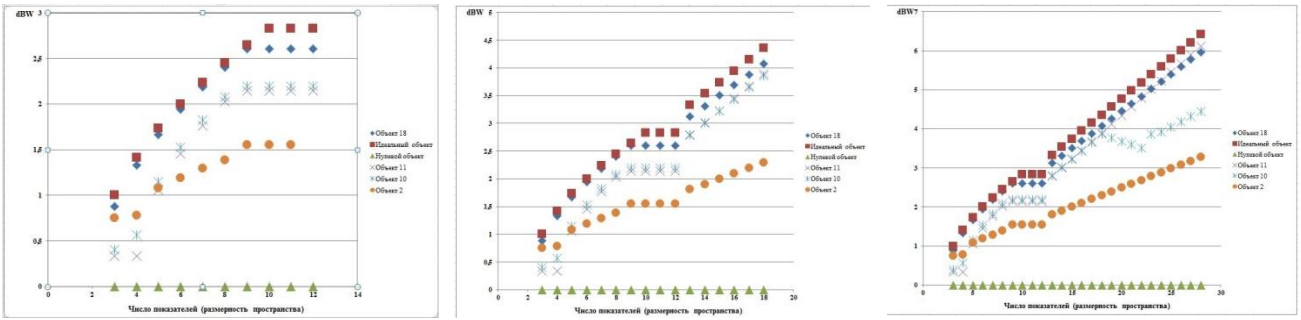


Рисунок 4 – Траектории развития объектов: изменение пространства критериев во времени

Анализ полученных траекторий показал, что чем ближе расстояние от исследуемого объекта к «идеальной» траектории, тем выше его эффективность, т.е. значение обобщенного показателя на анализируемом участке не увеличивается относительно «идеального» объекта.

Для наглядного и комплексного анализа решений применены радарные диаграммы, отображающие значения всех частных критериев одновременно. Такой подход позволяет в едином представлении оценить баланс между конфликтующими показателями, выявить доминирующие факторы и сгруппировать критерии по их влиянию на достижение глобальной цели (рисунок 5–а).

Визуализация результатов выполнена в виде наглядных диаграмм, позволяющих оперативно оценивать эффективность компонентов технической системы (рисунки 5–б, 5–в).

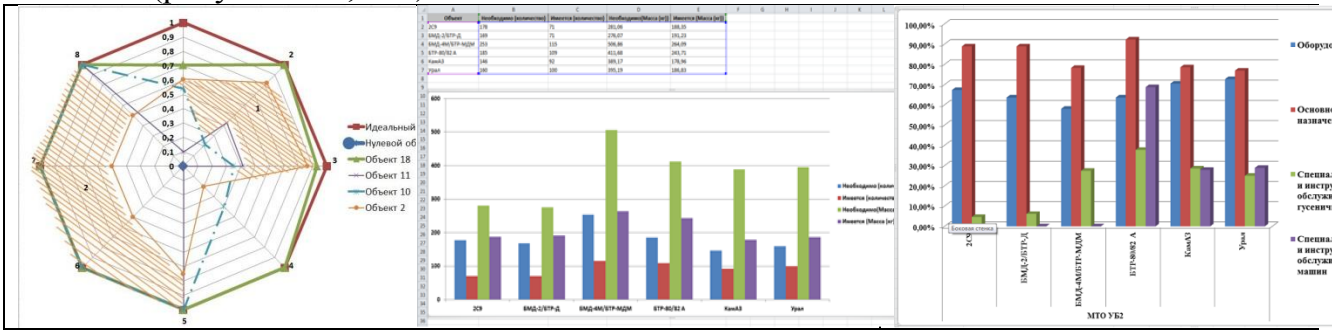


Рисунок 5 – Визуализация результатов: (а) – сравнительный анализ на радарной диаграмме, (б) – диаграмма оптимизации компонент технической системы, (в) – диаграмма покрытия критически важных агрегатов технической системы

Приведённые диаграммы наглядно демонстрируют эффективность предложенного подхода, в технической системе выявляется оптимальный набор компонентов, минимизирующий избыточность и максимизирующий готовность к эксплуатации.

Получены рекомендации СППР для технической системы (таблица 3).

Таблица 3 – Рекомендации СППР

Предметная область	Исходные данные	Рекомендации
Техническая система (ВДВ)	<p>Техническое оборудование: 1029 инструментов;</p> <p>Ограничения: масса комплекта ≤ 500 кг стоимость комплекта ≤ 1 млн. руб. базовое время ремонта - 2 ч 28 мин. = 2.47ч</p> <p>Критерии: 1. время ремонта (min); 2. масса комплекта (min); 3. стоимость (min) ; 4. вероятность восстановления (max)</p> <p>Статистические данные: вероятностные оценки восстановления агрегатов (диапазон: 0.72–0.98), полученные на основе анализа ремонтной документации.</p> <p>Метрика: Чебышева ($\alpha=0.6$)</p>	<p>Оптимальный комплект: 187 инструментов;</p> <p>Масса: 480 кг (соответствует ограничению);</p> <p>Стоимость: 810 тыс. руб. (на 19% ниже лимита);</p> <p>Среднее время ремонта: 2.1 ч (на 15 % меньше базового);</p> <p>Коэффициент технической готовности: 95 % (19 из 20 критически важных агрегатов покрыты).</p>
<p>Дополнительные рекомендации: рекомендовано исключить 15 редко используемых инструментов и добавить 3 позиции для повышения покрытия агрегатов с высокой частотой повреждений.</p> <p>Результат: повышение боевой готовности подразделения при соблюдении тактико-технических ограничений.</p>		

Таким образом, в рассматриваемой предметной области СППР на основе предложенных методов и алгоритмов автоматически выявляет узкие места, формирует конкретные, обоснованные рекомендации, обеспечивает измеримый прирост эффективности за счёт отказа от субъективности и учёта динамики, разнородности и стохастичности данных.

Сходимость разработанного комплекса алгоритмов многокритериального анализа данных подтверждена экспериментально: он демонстрирует монотонное убывание целевой функции, выход на плато за 12–18 итераций, при увеличении размера выборки число итераций остаётся стабильным – это подтверждает его **масштабируемость и устойчивость** (рисунок 6).

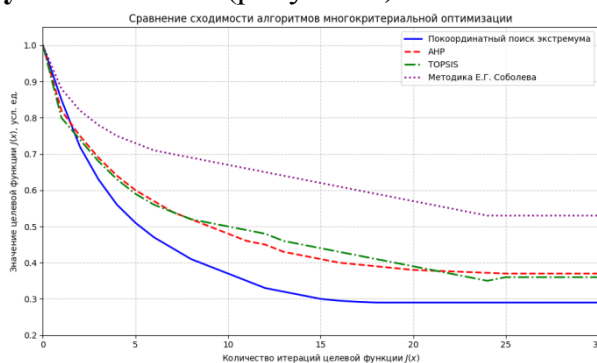


Рисунок 6 – Сравнение сходимости целевой алгоритмов многокритериальной оптимизации

На третьем этапе проведён сравнительный анализ с известными подходами.

Результаты эксперимента показали, что в технической системе достигнут коэффициент технической готовности 95 %, исключена избыточность комплекта технического оборудования на 18-22 % без потери ремонтно-восстановительных возможностей, время принятия решений сокращено на 25-30% по сравнению с классическими методами.

Таблица 4 – Результаты сравнительного анализа

Показатель	Классические методы	Предложенная СППР	Улучшение
Коэффициент технической готовности, %	85 %	95 %	10 %
Эффективность функционирования СППР, отн. ед.	1,0	1,2	20 %
Обобщённый показатель эффективности, отн. ед.	1,0	1,0482	4,82 %
Время принятия решений (с)	3,0	2,1	30 %
Учёт динамики критериев	нет	да	

Таким образом, полученные результаты подтверждают преимущество разработанного подхода за счёт интеграции метрического анализа, адаптивной обработки данных и отказа от субъективных экспертных оценок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования многокритериальных информационных процессов, разработаны методы, алгоритмы, методика и система поддержки принятия решений, позволяющие повысить эффективность управления, оперативность и объективность принятия решений в технической системе.

Получены следующие результаты диссертационной работы.

1. Проведен анализ существующих подходов к многокритериальному анализу данных в СППР, в результате которого выявлены их ключевые недостатки при работе с динамически изменяющейся структурой критериев, разнородной природой показателей и стохастической неопределенностью параметров.

2. Предложены методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающиеся от известных подходов возможностью корректной обработки критериев в пространстве переменной размерности, обеспечивающие учет временной динамики, разнородности и стохастичности данных без субъективного задания весов. При практической апробации в задаче комплектации систем восстановления достигнут коэффициент технической готовности 95%, что на 10% превышает результаты при использовании известных методов (Положение 1).

3. Создан комплекс вычислительно эффективных алгоритмов, интегрирующий методы идеальной траектории и двойной эталонной оценки, отличающийся от существующих реализаций автоматизацией принятия решений и поддержкой динамической структуры данных. Комплекс алгоритмов обеспечивает сокращение времени принятия оперативных решений на 25–30% по сравнению с известными аналогами (Положение 2).

4. Разработана методика формирования специального комплекта оборудования для систем восстановления на основе предложенных методов и алгоритмов, отличающаяся от известных подходов учетом многозадачности, анализом рисков, автоматизацией оптимизации. Методика обеспечивает повышение эффективности выполнения функций СППР на 20% за счёт отказа от субъективных экспертных оценок и использования статистических данных (Положение 3)

5. Создана и внедрена система поддержки принятия решений, интегрирующая разработанные методы, алгоритмы и методику в единую программную платформу с поддержкой динамических данных, адаптивной обработки пропусков и визуализацией траекторий.

Совокупность полученных результатов создает предпосылки для разработки нового поколения интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных обеспечивать объективное, оперативное и гибкое управление в условиях многокритериальности, динамики и неопределённости.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Щенёва Ю.Б. Программный алгоритм моделирования комплектации технологического оборудования в подвижных мастерских / Щенёва Ю.Б., Гавзов В.В., Щенёв Е.С., Арешин Г.В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Тула.– 2021. № 5. С. 309-316.

2. Щенёва Ю.Б. Модель освоения образовательных компетенций с использованием инструментария интеллектуального анализа данных / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Щенёв Е.С., Бодров О.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. № 84. С. 119-132.

3. Щенёва Ю.Б. Алгоритм многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений / Щенёва Ю.Б. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. № 92. С. 202-212.

4. Щенёва Ю.Б. Модель процесса формирования специального комплекта оборудования технической системы с использованием многокритериальной оптимизации / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Майков К.А., Щенёв Е.С. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. № 93. С. 130-142.

5. Щенёва Ю.Б. Модель многокритериального анализа данных для системы поддержки принятия решений / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. № 94. С. 124-138.

Публикации в изданиях, индексируемые в международных реферативных базах (Web of Science и (или) Scopus)

6. Yu B Shcheneva Information Process Management Based on Trajectory Analysis in Multidimensional Metric Spaces / Shcheneva, J.B., Pytkin, A.N., Bubnov, S.A., Bubnov, A.A., Bodrov, O.A., Shchenev, E.S. // In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) Artificial Intelligence for System Oriented Design. CoMeSySo 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1489. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96798-6_18

Статьи в других изданиях и материалах конференций

7. Щенёва Ю.Б. Программный алгоритм моделирования процесса формирования оптимального состава технологического оборудования в подвижных средствах ремонта / Щенёва Ю.Б., Гавзов В.В. // «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Материалы XXV Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2020. С. 115-116.

8. Щенёва Ю.Б. Особенности проектирования базы данных для цифровой технологии обучения IT-специалистов / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н. // «Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2021. материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов». Рязань, 2021. С. 190-192.

9. Щенёва Ю.Б. Особенности проектирования базы данных для информационных систем / Щенёва Ю.Б., Бодров О.А. // «Методы и средства

обработки и хранения информации. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 2021. С. 166-169.

10. Щенёва Ю. Б. Формирование показателей эффективности управления организационным процессом подготовки IT-специалистов в вузе / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Щенёв Е.С. // «Актуальные проблемы естественных, математических, технических наук и их преподавания. Сборник научных трудов». Липецк, 2022. С. 207-212.

11. Щенёва Ю. Б. Повышение эффективности управления организационным процессом подготовки IT-специалистов в вузе / Щенёва Ю.Б., Бодров О.А., Бубнов С.А., Майков К.А. // «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2022. С. 10-13.

12. Щенёва Ю. Б. Разработка программного и методического обеспечения электронного дистанционного учебного курса с применением элементов искусственного интеллекта контроля знаний / Щенёва Ю.Б., Гавзова Е.В., Щенёв Е.С. // Информатика и прикладная математика. 2022. № 28. С. 27-32.

13. Щенёва Ю. Б. Определение показателей в модели оценки знаний на основе многокритериального анализа / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2022. С. 89-90.

14. Щенёва Ю. Б. Анализ освоения образовательных компетенций с помощью траекторий многомерного пространства / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Попов Д.И. // Сборник трудов VI Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2023). Том 4». Рязань, 2023. С.24-28.

15. Щенёва Ю. Б. Контроль освоения образовательных компетенций в процессе обучения IT-специалистов на основе анализа траекторий многомерного пространства / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Щенёв Е.С. // Сборник трудов Всероссийского конкурса профессионального мастерства с международным участием «Методическое обозрение: современный образовательный процесс в РФ, внедрение в практику работы инновационных учебных технологий, методик, инструментов и воспитательных систем». Чебоксары.-2023. Конкурсная работа размещена на сайте Педагогического сообщества “Ped-library.ru” 16+ <https://ped-library.ru/> СМИ: Педагогическое сообщество “Ped-library.ru” Эл № ФС 77 – 74225

16. Щенёва Ю. Б. Контроль освоения образовательных компетенций в процессе обучения IT-специалистов на основе анализа траекторий многомерного пространства // Специальный сборник трудов Всероссийской НПК с международным участием «Информационный обмен в междисциплинарных исследованиях II. Взгляд начинающих ученых». Рязань.-2023. С.87–91.

17. Щенёва Ю. Б. Управление процессом на основе анализа траекторий в многомерных метрических пространствах / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2023. С. 89-91.

18. Щенёва Ю. Б. Анализ траекторий в многомерных метрических пространствах для управления процессом // «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2024. С. 190-194.

19. Щенёва Ю. Б. Особенности разработки интеллектуальных программных средств анализа результатов освоения компетенций / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н. // «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2024. С. 196-199.

20. Щенёва Ю. Б. Применение методов кластерного анализа для обработки разнородной информации в базах данных / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2024. С. 80-81.

21. Щенёва Ю. Б. Разработка интеллектуальных методов принятия решений на основе анализа данных / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2024. С. 78-79.

22. Щенёва Ю. Б. Классификация данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н. // Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2025). Том 4». Рязань, 2025. С.76-81.

23. Щенёва Ю. Б. Интеллектуальный анализ данных с использованием методов визуализации / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н., Майков К. А.// Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2025). Том 4». Рязань, 2025. С.81-83.

24. Щенёва Ю. Б. Разработка интеллектуальных методов принятия решений на основе анализа данных / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н. // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2025. С. 169-172.

25. Щенёва Ю. Б. Особенности разработки программного обеспечения для обмена и размещения цифрового контента / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Подзоров Д.Ю. // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2025. С. 186-192.

26. Щенёва Ю. Б. Метод классификации векторных объектов с использованием капсульных нейронных сетей / Щенёва Ю.Б., Майков К.А., Тартыков Л.Е. // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. Межвузовский сборник научных трудов. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2025. С. 61-65.

27. Щенёва Ю. Б. Методы многокритериальной оптимизации для систем поддержки принятия решений / Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2025. С. 80-81.

28. Щенёва Ю. Б. Разработка методов интеллектуального анализа данных для поддержки принятия решений / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2025. С. 78-79.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

29. База данных для программ моделирования комплектации технологического оборудования в подвижных средствах восстановления вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск [Текст]: Свидетельство о гос. регистрации базы данных 2020621425 Рос. Федерация / Гавзов В.В., Щенёва Ю.Б. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. 2020621309 04.08.2020; опубл. 13.08.2020, Бюл. № 8 – 1 с.

30. Программа моделирования рационального комплекта технологического оборудования для вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск в подвижных мастерских технического обслуживания и ремонта. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020662864 Рос. Федерация / Гавзов В.В., Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. № 2020662241 13.10.2020; опубл. 20.10.2020, Бюл. № 10 – 1 с.

31. Программа электронного дистанционного учебного курса с применением элементов искусственного интеллекта контроля знаний. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023613666 Рос. Федерация / Щенёв Е.С., Щенёва Ю.Б., Бодров О.А.; Правообладатель ФГБОУ ВО РГРТУ им. В.Ф. Уткина (RU); заявл. № 2023612045 03.02.2023; опубл. 17.02.2023.

32. Анализ действий парашютиста по управлению планирующей парашютной системой на основе метода полигауссовой аппроксимации. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023616570 Рос. Федерация / Бодров О.А., Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. № 2023613347 15.02.2023; опубл. 29.03.2023.

33. База данных для формирования специального комплекта оборудования технической системы методами многокритериальной оптимизации [Текст]: Свидетельство о гос. регистрации базы данных 2025623893 Рос. Федерация / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С.; Правообладатель ФГБОУ ВО РГРТУ им. В.Ф. Уткина (RU); заявл. 2025623530 14.08.2025; опубл. 18.09.2025, Бюл. № 8 – 1 с.

34. Модель формирования специального комплекта оборудования технической системы с использованием многокритериальной оптимизации. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025685660 Рос. Федерация / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С.; Правообладатель ФГБОУ ВО РГРТУ им. В.Ф. Уткина (RU); заявл. № 2025683643 14.08.2025; опубл. 25.09.2025.

Щенёва Юлия Борисовна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать. Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.