

На правах рукописи

Романова-Большакова Ирина Константиновна

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ И ИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕННОЙ
СТРАТЕГИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ,
МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика (технические системы)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 2023



Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный консультант доктор технических наук, профессор РАН
Роман Валерьевич Мещеряков

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится _____ в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана в аудитории 613м по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 202_г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.14.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Кандидат технических наук, доцент _____ И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Задача повышения технического уровня, эффективности и качества функционирования управляемых технических систем является традиционно актуальной проблемой, однако в последние годы формируются процессы, происходящие в теории, проектировании и эксплуатации таких систем, связанные с усложнением их структуры, условий эксплуатации, усилений требований качества функционирования и экономичности, что является появлением действия фундаментального закона усложнения системной организации управляемых технических систем. Проблема прогнозирования и поддержки принятия решений, сформулированная как одна из основных задач интеллектуального анализа данных, должна быть решена с учетом совершенствования методов многокритериальной оптимизации и моделирования и с формирования новых перспективных направлений развития теории и практики.

Круг практического применения результатов исследований, выполненных в диссертации исследований, составляют проектирование и эксплуатация технических объектов и их систем управления. Для разработки методологии создания и эксплуатации таких систем и их составных частей в современных условиях необходимо сформулировать цель, решить основные задачи и проверить положения методологии. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и эксплуатации технических систем в целом.

Проблемы оптимизации и моделирования, в том числе многокритериальные, рассматривались в академических трудах таких ученых, как А.А. Самарский, М.В. Келдыш, Н.Н. Моисеев, А.Н. Тихонов, А.Н. Крылов, А.И. Берг, В.М. Глушков, Д.А. Поспелов, Л.В. Канторович, Л.С. Понтрягин, А.А. Дородницын, Ю.Г. Евтушенко, А.В. Лотов, И.М. Соболев, Р.Б. Статников, Н.Н. Красовский, Е.М. Воронов, В.Д. Ногин, В.В. Подиновский, И.Г. Черноуцкий, Ф.А. Черноушко и др. Методы теории управления развивались такими учеными, как В.В. Солодовников, А.А. Воронов, Е.П. Попов, В.А. Бесекерский, Е.Н. Розенвассен, В.И. Зубов, Я.З. Цыпкин, А.А. Вавилов, Р.М. Юсупов, А.А. Красовский, Е.М. Воронов, Л.А. Растрингин и др. В области методов интеллектуального анализа данных свой вклад внесли такие ученые как М.А. Айзерман, В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис, В.Д. Мазуров, Соколов Б. В., А.Г. Ивахненко, Г.С. Лбов, Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, Х.А. Таха, А. Гилл, Р.Е. Гудсон, М.П. Поулис, О. Балчи, Т. Нейлор, А Прицкер, Дж. Форрестер, Р. Шеннон, В.А. Штофф, Г. Клаус, Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт, Д. Касти, Г. Кун, А. Таккер, Дж. Данциг, Д. Гейл, Р.Т. Рокафеллар, Р. Курант и др.

Научная проблема. Разработка новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны за счет повышения эффективности и качества функционирования технических объектов и их систем управления.

Фундаментальная научная проблема. Установление причинно-следственных связей в сложной иерархической системе.

Для решения этих проблем разработана методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, разработаны и внедрены комплексные

методы исследования, прогнозирования, поддержки принятия решений как в выбранной области практического применения, так и за ее пределами на этапах жизненного цикла создания и эксплуатации систем.

Объектом диссертационного исследования являются критерии и модели оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Предмет исследования: принципы, методы, методическое и алгоритмическое обеспечение многокритериальной оптимизации и моделирования технических систем, методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений в технических системах, методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем, визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации, включая методы интеллектуального анализа данных.

Методы исследования основываются на использовании системного анализа, теории управления, методов оптимизации, идентификации и интеллектуального анализа данных, включая аналитические, численные и экспериментальные методы исследований технических систем.

Целью исследований является повышение качества технических объектов и их систем управления на основе объединения и развития технологий многокритериальной оптимизации, моделирования и методов интеллектуального анализа данных как единой концепции.

Для достижения указанной цели сформированы **следующие задачи:**

1. Анализ существующих методов, методических и алгоритмических средств многокритериальной оптимизации, моделирования технических объектов и их систем управления и новых технологий интеллектуального анализа данных, выявить проблемы и определить направления исследований.

2. Фундаментальная проблема установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе, применительно к поставленной цели исследований.

3. Задача разработки объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных для решения фундаментальной и прикладной научных проблем, включая формирование механизмов объединения.

4. Принципы и основные составляющие методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных и ее связи с жизненным циклом технических систем.

5. Проблема размерности и определение места многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем. Постановка и решение задач разработки ансамблей критериев качества, включая метакритерии, соответствующих разрабатываемой методологии на этапах создания и эксплуатации технических систем.

6. Обобщенная структурная схема процесса исследования технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной и прикладной научных проблем.

7. Постановка задачи и разработка общего теоретического подхода к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и прогнозирования, применяемых для проектирования и эксплуатации систем, как задач управления.

8. Постановка и решение задачи активного управления фронтом Парето. Формулировка подхода к фронту Парето как объекту многокритериальной оптимизации и управления, определение критериев качества фронта и решение задачи с позиций теории оптимального управления.

9. Новые стратегии организации моделирования в том числе, имитационного для решения фундаментальной и прикладной научных проблем, включая:

- формирование ансамбля критериев качества моделирования для задач построения модели и численных расчетов;
- формирование областей исследований в рамках решения общей задачи формирования пространства входных и выходных параметров системы включая детерминированные, нерегулярные и стохастические переменные;
- новые подходы к повышению эффективности вычислительных экспериментов в соответствии с критериями качества моделирования для численных расчетов;
- новые подходы к задаче формирования областей адекватности с критериями качества моделирования для задач построения моделей.

10. Фундаментальная проблема новой трактовки метода аналогий, методологические аспекты новой формулировки для решения задач моделирования и на ее основе создать конкретные методы.

11. Постановка и решение задачи формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования состояния технических объектов предметной области на этапе создания и эксплуатации систем.

12. Новые методы исследования, диагностики и прогнозирования технических объектов предметной области, включая аналитические методы, в том числе для установления причинно-следственных связей в системах, на этапе их создания и эксплуатации.

13. Методы решения задач исследования и диагностики технических объектов на основе интеллектуального анализа данных в процессе эксплуатации систем.

14. Апробация методологии к созданию и эксплуатации технических объектов, их систем управления и составных частей и сделать оценки технико-экономических показателей эффективности методологии и ее частей.

Научная новизна заключается в следующем:

Разработана новая методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления и ее основные составляющие на основе единой стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, являющаяся научно-практической базой повышения эффективности и качества функционирования управляемых технических систем, разработки и внедрения комплексных методов исследования, прогнозирования, поддержки принятия решений в проектировании и эксплуатации технических объектов, в том числе:

1. Разработаны принципы новой методологии, включая формулировку и решение фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе применительно к поставленной цели исследований, поддержку принятия решений как новую формулировку проблем многокритериальной оптимизации и моделирования с учетом возможностей интеллектуального анализа данных, чем было достигнуто продвижение на следующий уровень в исследовании технических систем. Создание эффективных механизмов формирования новых внутренних связей между тремя технологиями обеспечило взаимное их обогащение и с учетом связи с жизненным циклом технической системы позволило ускорить процессы разработки управляемых технических объектов.

2. Сформулирована и решена проблема размерности и места многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем, в том числе с учетом новых подходов интеллектуального анализа данных, что позволило расширить методологическую фундаментальную и научно-практическую базу для определения направлений новых исследований и совершенствования управляемых технических систем. На основе стратегии объединения трех основных технологий поставлена и решена задача разработки ансамблей критериев качества, включая метакритерии, позволившая создать и оптимизировать конкретные ансамбли критериев, соответствующие этапам исследования, проектирования и эксплуатации управляемых технических систем.

3. Разработана обобщенная структурная схема процесса исследования управляемых технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной и прикладной научных проблем, позволившая решить фундаментальную проблему организации непрерывного цикла создания и эксплуатации систем.

4. Поставлена и решена задача разработки общего теоретического подхода к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и прогнозирования, как задач управления, состоящего в переходе от пространства состояний системы к пространству критериев, параметров новых моделей объекта с определением соответствующих управлений. Применение этого подхода позволило как создать новые эффективные методы в каждой из трех технологий для решения задач проектирования и эксплуатации систем, включая сходимости и скорость решения, так разработать и реализовать внутренний механизм их взаимосвязи.

5. Поставлена и решена задача активного управления фронтом Парето, позволившая определить конкретные направления изменения параметров системы и более обоснованно формировать требования к критериям в задаче многокритериальной оптимизации.

6. Формулировка подхода к фронту Парето как объекту многокритериальной оптимизации и управления и определение критериев качества фронта позволили решить задачу управления фронтом с позиций теории оптимального управления, создать методы поддержания робастности динамического фронта, что обеспечило сохранение качества принимаемых решений при изменении параметров системы, в том числе избежать потери контроля за поведением фронта при неблагоприятном сочетании внешних и

внутренних факторов. Разработанная методология управления фронтом Парето позволила открыть факт порождения новых «вложенных» фронтов Парето.

7. Разработаны новые стратегии организации моделирования, в том числе, имитационного, для решения фундаментальной и прикладной научных проблем, позволившие на основе объединения трех технологий повысить качество проводимых исследований, обоснованно выбирать перспективные области, обеспечивающие качество разрабатываемой технической системы, сократить вычислительные затраты за счет:

- формирования ансамбля критериев качества моделирования для задач построения модели и численных расчетов;
- формирования областей исследований в рамках формирования пространства входных и выходных параметров, включая детерминированные, нерегулярные и стохастические переменные;
- подходов к повышению эффективности вычислительных экспериментов в соответствии с критериями качества моделирования для численных расчетов, в том числе формирование переменных оптимальных сеток, адаптированных к динамически изменяющимся параметром системы;
- подходов к задаче формирования областей адекватности на основе разработанных критериев качества для задач построения моделей, в том числе десять подходов к исследованию областей адекватности моделей движения в динамической постановке.

8. Решена фундаментальная проблема новой трактовки метода аналогий, а именно, перенос особенностей процессов функционирования одних систем на процесс организации исследований других систем. Одним из воплощений решения фундаментальной проблемы явился перенос идей управления объектами на управление моделями и критериями. Разработаны методологические аспекты для решения задач моделирования и созданы конкретные методы.

9. Поставлена и решена задача формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования состояния технических объектов предметной области на этапе создания и эксплуатации систем, позволившая повысить обоснованность оценок состояния и принятия решений.

10. Разработанные новые методы исследования, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области, реализующие решение фундаментальной задачи установления причинно-следственных связей в системах, включая аналитические методы и методы на основе интеллектуального анализа данных позволили повысить качество функционирования и прогнозирования в технических системах позволили для поврежденных не катастрофического характера формировать законы управления по текущему состоянию, для поврежденных, приводящих к катастрофическим последствиям, оперативно вмешиваться в ситуацию и сохранить объект путем своевременного прекращения движения.

Научная и практическая ценность работы состоит в разработке методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединения многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных через механизмы формирования новых внутренних связей между тремя технологиями и решение

фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе для выбранной области исследований, и определяется возможностью использования разработанных методов, моделей и программ для комплексного решения проблемы поддержки принятия решений при разработке технических объектов и их систем управления и повышение качества принимаемых научно-технических решений.

К основным практически значимым результатам относятся:

1. Повышение качества технических объектов и их систем управления за счет совершенствования моделей, в том числе, используемых для диагностики повреждений, прогнозного обслуживания и адаптивного управления в технических системах, многокритериальной оптимизации критериев качества и индикаторов состояния систем.

2. Ускорение процесса решения научных и технических проблем создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления, за счет сокращения времени и трудозатрат на разработку и диагностику.

3. Повышение качества функционирования технических объектов за счет усиления обоснованности принимаемых решений в процессе создания и эксплуатации на этапах жизненного цикла.

4. Сокращение энергетических затрат на функционирование систем управления техническими объектами за счет улучшения качества моделей, используемых для создания систем управления.

5. Разработанные алгоритмы и комплексы компьютерных программ формирования моделей, критериев качества моделей и управления процессами моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе единой стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, эффективных механизмов формирования новых внутренних связей между тремя технологиями, взаимно обогащающих эти технологии, решения фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе применительно к поставленной цели исследований, использование разработанных методов, моделей и программ для комплексного решения проблемы поддержки принятия решений при разработке технических объектов и их систем управления и повышение качества принимаемых научно-технических решений на этапах жизненного цикла.

2. Ансамбль критериев качества, включая метакритерии, соответствующих разрабатываемой методологии на этапах создания и эксплуатации технических систем, формулировка проблемы размерности и места многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем.

3. Общий теоретический подход к разработке методов многокритериальной оптимизации, моделирования и прогнозирования как задач управления, позволивший как создать новые эффективные методы в каждой из трех технологий исследований, так разработать и реализовать внутренний механизм их взаимосвязи.

4. Новый подход и методы решения задачи многокритериальной оптимизации, в том числе постановка и решение задачи управления фронтом Парето как объектом многокритериальной оптимизации и управления, дающий теоретическую основу формирования обоснованного выбора проектных решений для технических объектов и их систем управления.

5. Новые стратегии организации моделирования, в том числе, имитационного, для решения фундаментальной и прикладной научных проблем на основе разработанной методологии, в том числе, формирование ансамбля критериев качества моделирования для задач построения модели и численных расчетов; формирование областей исследований в рамках формирования пространства входных параметров; новые подходы к повышению эффективности вычислительных экспериментов в соответствии с критериями качества моделирования для численных расчетов; новые подходы к задаче формирования областей адекватности с критериями качества моделирования для задач построения моделей.

6. Решение фундаментальной проблемы разработки новой трактовки метода аналогий, методологические аспекты ее применения для решения задач моделирования и созданные на ее основе конкретные методы исследований.

7. Методы формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования технических объектов предметной области на этапе создания и эксплуатации систем.

8. Методы исследования, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области, реализующие решение фундаментальной задачи установления причинно-следственных связей в системах, включая аналитические методы, на этапе создания и эксплуатации управляемых технических объектов.

9. Методы решения задач исследования и диагностики технических объектов в процессе создания и эксплуатации систем на основе интеллектуального анализа данных.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации использованы в опытно-конструкторских работах, руководимых автором в рамках государственных контрактов с ПАО «РКК «Энергия» (результаты интеллектуальной деятельности – акт РИД договора 1922730301751217000241351/ММП93 от 28.04.2020 г., используемые для формирования структуры и реализации аппаратно-программных средств автоматизированного рабочего места широкополосной системы связи; результаты интеллектуальной деятельности - акт РИД договора 1922730301751217000241351/ММП-91 от 16.09.2020 г., используемые для создания аппаратно-программных средств для отработки суточных программ полета и полетной документации при полете модуля МЛМ в составе РС МКС); в разработке новых композитных материалов в АО «НИИграфит» им. С.Е. Вяткина (Акт использования в производстве изделий из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ)). Основные алгоритмы и программы зарегистрированы и имеют свидетельства о государственной регистрации (8 свидетельств).

Материалы диссертации использованы в курсах лекций «Интеллектуальный анализ данных», «Автоматизированное проектирование мехатронных систем», «Методы оптимизации и их применение в проектировании систем управления объектов мехатроники и робототехники», «Моделирование и исследование мехатронных систем», «Применение методов искусственного интеллекта в проектировании и эксплуатации систем мехатроники и робототехники» магистрантов 1 и 2 курсов кафедры робототехнические системы и мехатроника, «Управление техническими системами» специалистов 5 курса кафедры ракетные и импульсные системы МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 12 конференциях и конгрессах, в том числе «Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Всероссийская научно-практическая конференция», Москва (2018), «Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Международный конгресс», Москва, (2019-2022), «Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. КОРОЛЁВА и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства» (2019-2021), «Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения» (2020), «Будущее машиностроения» (2019), «4th International Conference on Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications (ACMTAA)», 5–6 November 2015, Wrexham, UK, «105th anniversary of the founder of the Scientific and Educational Center of Bauman Moscow State Technical University Academician E. P. Popov» (2020).

Публикации по работе. Результаты отражены в 65 работах из РИНЦ, в т. ч. 17 статей из перечня ВАК, 19 статей из баз Scopus и Web of Science, патенты и зарегистрированные программы для ЭВМ – всего 8. 37 работ написано без соавторства.

Личный вклад.

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. Во всех совместных исследованиях автору принадлежит ведущая роль в руководстве работами, формулировке задач, организации экспериментальных исследований, программной реализации расчетных методов, тестировании разработанного программного обеспечения и анализе результатов.

Соответствие специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности **2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)** в части развития методов системного анализа сложных прикладных объектов исследования, обработки информации, вопросы анализа, моделирования, оптимизации, совершенствования управления и принятия решений, с целью повышения эффективности функционирования объектов исследования, пп. Паспорта: 02, 03, 04, 05, 11.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 285 наименований. Основной текст работы изложен на 369 страницах, содержит 163 рисунков, 8 таблиц, 8 Приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цель и основные задачи исследования, формулируются научная

новизна, практическая ценность полученных результатов и основные результаты, выносимые на защиту, дается краткая характеристика содержания глав диссертации.

В **Главе 1** приводится анализ существующих методов, методических и алгоритмических средств многокритериальной оптимизации и моделирования технических объектов и их систем управления и новых технологий интеллектуального анализа данных. Рассмотрена связь рассматриваемых задач с жизненным циклом сложной технической системы.

Выявлены проблемы, дана постановка задачи и сформулирована тема диссертации.

Выделены следующие проблемы:

- Несмотря на большие достижения в области алгоритмов, численных методов и программных реализаций методов оптимизации, в том числе многокритериальной и моделирования, не в полной мере реализуются возможности совместного использования указанных методов.

- Разработанные методы и алгоритмы многокритериальной оптимизации и моделирования не соответствуют в полной мере широким возможностям, открываемым современными методами и технологиями интеллектуального анализа данных.

- Возможности аналитических исследований задач многокритериальной оптимизации развиваются недостаточно. Необходимо найти и сформулировать новые задачи, где бы мог эффективно применяться принцип Парето.

- Методы теории оптимального управления могут использоваться и для решения разнообразных проблем моделирования, включая выработку стратегий исследований, анализа результатов моделирования и т.д. Необходимо сформулировать и решить соответствующие задачи.

- Вопросы объединения теории и практики интеллектуального анализа данных, многокритериальной оптимизации и моделирования нуждаются в проведении полномасштабных исследований. Внутренние механизмы и связи между тремя технологиями в настоящее время исследованы весьма слабо. Решение задачи формирования объединенной технологии должно быть выполнено на уровне разработки общей концепции и ее отдельных компонент.

- Новое объединение трех технологий требует формирования и новых систем критериев качества.

- Выдвинуто предположение, что проводимые исследования позволят сократить число и время прохождения витков спирали жизненного цикла технической системы.

- Формулировка темы диссертации: разработка методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединения многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных.

Сформулирована цель исследований: повышение качества технических объектов и их систем управления на основе объединения и развития технологий многокритериальной оптимизации, моделирования и методов интеллектуального анализа данных как единой концепции. Ожидаемыми результатами являются

повышение эффективности и надежности технических объектов и их систем управления на этапах жизненного цикла создания и эксплуатации, разработки и внедрения комплексных методов исследования, прогнозирования, поддержки принятия решений как в выбранной области практического применения, так и за ее пределами.

В **Главе 2** представлена постановка задачи разработки объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных как основы для главной задачи диссертационного исследования - методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления и ее основных составляющих.

Представлена формулировка фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной системе применительно к цели диссертационных исследований и определены вытекающие из фундаментальной проблемы основные пять задач. Общим методом решения перечисленных проблем является разработка эффективного механизма формирования внутренних связей между многокритериальной оптимизацией, моделированием и интеллектуальным анализом данных. Такая постановка задачи связана как с объективным наличием таких связей, что показывается в разделах диссертации, так и с необходимостью решения фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной системе, которой является в данном случае методология создания и проектирования.

Рассматривается совместный, неразрывный, взаимообогащающий подход к объединению трех составляющих технологии и разработке механизма такого объединения. Для включения в триаду проведены исследование особенностей применения интеллектуального анализа данных (Data Mining) в технических приложениях и сравнительный анализ Data Mining и моделирования технических систем, включая задачи многовариантного анализа. Ставится задача перехода на качественно иной уровень объединенного исследования технических систем через формирование конвергентного знания на основе интеграции математической, естественно-научной, инженерно-технической и социально-гуманитарной составляющих, конечной целью таких исследований будет поддержка принятия решений в создании и эксплуатации систем.

Определены принципы и основные составляющие методологии. Принципы новой методологии включают:

- поддержка принятия решений как новая формулировка проблем формулировка проблем и многокритериальной оптимизации и моделирования с учетом возможностей интеллектуального анализа данных и продвижение на следующий уровень в исследовании технических систем;
- создание эффективных механизмов формирования новых внутренних связей между тремя технологиями;
- связь с жизненным циклом технической системы;
- связь с решением фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе, применительно к поставленной цели исследований.

Методология включает следующие основные компоненты:

1. Принципы методологии.

2. Обобщенная структурная схема процесса исследования технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной и прикладной научных проблем.

3. Проблема размерности и задачи многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем.

4. Новые ансамбли критериев качества, включая метакритерии, соответствующих разрабатываемой методологии на этапах создания и эксплуатации технических систем.

5. Общий теоретический подход к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и прогнозирования, применяемых для проектирования и эксплуатации систем, как задач управления.

6. Новые стратегии организации моделирования, в том числе, имитационного, включая: формирование ансамбля критериев качества моделирования; формирование областей исследований в рамках формирования пространства входных параметров; новые подходы к повышению эффективности вычислительных экспериментов в соответствии с критериями качества моделирования для численных расчетов; подходы к задаче формирования областей адекватности.

7. Методологические аспекты новой формулировки метода аналогий для задач организации исследований и созданные на ее основе конкретные методы.

8. Формирование и многокритериальная оптимизация индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования состояния технических объектов предметной области на этапе эксплуатации систем.

9. Методы исследования, диагностики и прогнозирования технических объектов предметной области, включая аналитические методы, в том числе для установления причинно-следственных связей в системах, на этапе их создания и эксплуатации.

10. Методы решения задач исследования и диагностики технических объектов в процессе эксплуатации систем на основе интеллектуального анализа данных.

Приводится общая классификация задач исследований. Разработана общая структура многокритериальной оптимизации и моделирования с учетом возможностей интеллектуального анализа данных.

Подробное описание всех компонентов и элементов структуры дано в диссертационной работе. Для организации исследований и разработки структуры диссертации была разработана общая схема, соответствующая как поставленным задачам, так и процессам, протекающим в управляемой технической системе (Рисунок 1), которая модифицируется после каждого этапа исследований.

Сформулированы проблема размерности и место многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем.

Приведена классификация задач многокритериальной оптимизации и ссылки на главы, в которых представлено решение соответствующих задач.

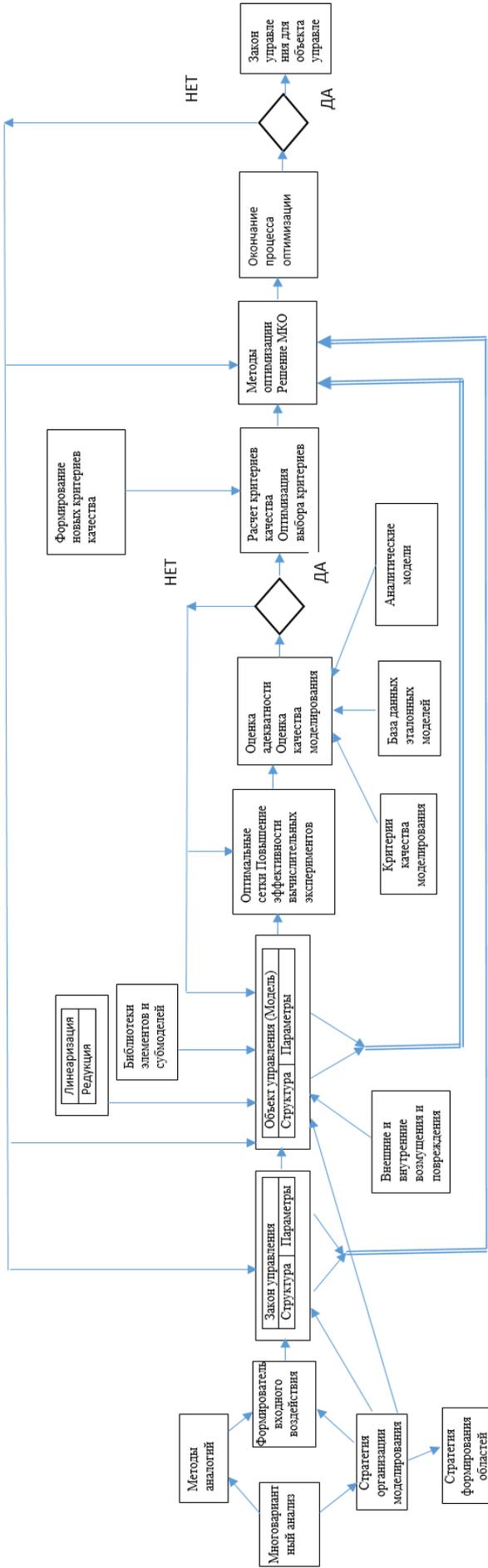


Рисунок 1. Процесс исследований и структура диссертации и

Глава	Положение диссертации	Глава	Положение диссертации	Связь	
1,2	Сравнительный анализ интеллектуального анализа данных Data Mining и моделирования технических систем. Поддержка принятия решений как новая формулировка проблем моделирования и оптимизации с учетом возможностей интеллектуального анализа данных и продвижение на следующий уровень в исследовании технических систем. Общая структура моделирования и многокритериальной оптимизации с учетом возможностей интеллектуального анализа данных. Проблема размерности и место многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем. Формирование абсолютных критериев качества, соответствующих новым задачам и классификация критериев. Механизм формирования новых внутренних связей между составными частями интеллектуального анализа данных.	4	Постановка задачи формирования общих критериев качества моделирования с позиций общей задачи создания и эксплуатации технических систем. Формирование новых стратегий организации процесса моделирования. Решение задачи моделирования пространства параметров с учетом плотности и других характеристик распределения критериев и индикаторов. Исчисление поведенных областей на границе допустимой области - метод штрафных функций.	МИ, ИМ; МИ, ИМ, ОМ, ИО; ОИ; МИ, ИМ, ОМ, МО; ОИ, ИО; ОИ; МИ, ИМ, ОМ, МО; ОИ, ИО; МО, ИО, ОО	ИО, ОМ, ОИ; ИО, ОМ, ОИ; МИ, МО; МО, ОМ; МО; МО; МИ, МО; МО, ОМ; МО, ОМ; ОИ, ИО; ОИ, ИО
3	Разработка общих теоретических методов моделирования, оптимизации и прогнозирования как задач управления. Применение аналитических методов к исследованию Парето-оптимальных систем управления. Фронт Парето как объект оптимизации и управления. Задача управления фронтом Парето как задача оптимального управления. Управление фронтом Парето как задача обеспечения робастности.	5	Повышение эффективности вычислительных экспериментов при моделировании управляемого движения летательных аппаратов. Проблема надежности и искажения моделей. Области адекватности, их изменения и оценки. Выделение в рассмотрение новых индикаторов. Задача многокритериальной оптимизации индикаторов состояния и критериев качества функционирования системы.	МО, ИО; МИ, ИО; МИ, ИО; ОМ, ИО; ОИ, ИО; ИО, ИО; ИИ, ИО	МО, ИО; МИ, ИО; ОМ, ИО; ОИ, ИО; ИИ, ИО

Рисунок 2. Механизм формирования новых внутренних связей между составляющими объединённой методологии

Классификация размерностей включает: размерность структуры; размерность пространства исследуемых параметров; размерность изменяемого пространства исследуемых входных параметров при проектировании (многокритериальная оптимизация) и эксплуатации; размерность изменяемого пространства исследуемых выходных параметров при проектировании (многокритериальная оптимизация) и эксплуатации и отмечена связь задачи сокращения размерности с подходами интеллектуального анализа данных и методов исследования сложных систем.

Решение задачи формирования критериев качества основывалось на возможностях объединенной методологии, что позволило разработать классификацию новых критериев. Конкретный набор частных критериев составляет структуру критериев. Параметры — это значения критериев, которые могут быть представлены через диапазоны или верхние и (или) нижние границы. В качестве параметров также могут выступать весовые множители значимости, выбор которых также нуждается в уточнении. Однако на такой традиционной трактовке исследования обычно останавливаются. Предположим, что полный набор критериев представляет собой структуру вида: $S = (J_1, \dots, J_n)$. Каждый элемент структуры (J_1, \dots, J_n) определен на двух множествах параметров: на исходном множестве $A(t)$ параметров задачи; на множестве параметров самих критериев $B_{J_i}(t)$. Ставится задача многокритериальной оптимизации структуры и параметров критериев: $S \Rightarrow \text{opt}; B_{J_i} \Rightarrow \text{opt}$.

Известна традиционная трактовка метакритерия как результата агрегатирования частных критериев. В диссертации предложен новый подход, позволяющий дать ответ на нерешенный вопрос о качестве самих частных критериев. Вводится новая трактовка понятия метакритериев как способов оценки качества критериев (критериев критериев). Разработаны и обоснованы способы формирования критериев, которые позволили создать новые ансамбли критериев, в том числе введение следующих пары: критерии основные и метакритерии (критерии критериев); критерии качества системы и ее разработки, в том числе новые критерии и индикаторы качества моделирования; новые критерии и индикаторы качества оценок состояния; новые критерии и индикаторы качества оценок надежности и прогнозирования.

Показаны результаты разработки механизмов формирования новых внутренних связей между тремя технологиями с учетом разработанных автором новых компонент трех технологий (Рисунок 2 - фрагмент).

В Главе 3 представлены обоснование необходимости, постановка и решение задачи разработки общих теоретических методов многокритериальной оптимизации, моделирования и прогнозирования, применяемых для создания и эксплуатации систем, как задач управления. Единой методологической базой для решения перечисленных задач может служить теория оптимального управления, которая при определенных условиях позволяет получать аналитические решения в частности реализовывать основной закон управления с обратной связью на основании решения уравнения Риккати.

Рассмотрен аналитический подход к задаче многокритериальной оптимизации, являющийся альтернативой к вычислительно затратным численным методам зондирования пространства параметров.

Сформулированы четыре утверждения, позволяющие по характеристикам контрамонотонности и комонотонности и угловой характеристике антиградиентов определить Парето - оптимальные решения. Проанализировано взаимное расположение антиградиентов и линии Парето (Рисунок 3) и разработан алгоритм расчетов.

Полученные результаты применяются к задаче параметрического синтеза двухконтурных систем управления движением летательных аппаратов. Показаны возможные направления улучшения противоречивых критериев времени нарастания и перерегулирования и отмечены пределы параметрической коррекции (Рисунок 4).

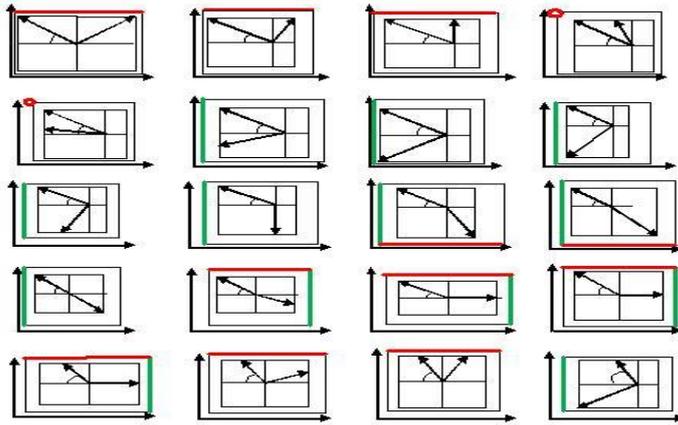


Рисунок 3. Взаимное расположение линий Парето и антиградиентов

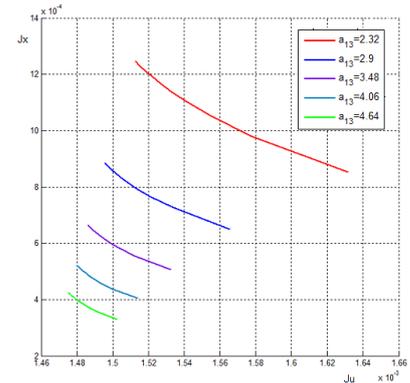


Рисунок 4. Влияние изменения динамического коэффициента a_{13}

Описана постановка задачи управления фронтом: изменение формы и параметров фронта (рангов) Парето может быть достигнуто за счет целенаправленного изменения параметров объекта управления, введений корректирующих устройств с заданными диапазонами вариаций. Представлена методика активного управления фронтом по критериям переходного процесса. Определена структура рангов Парето, их зависимость от свойств регулятора и условия перехода. Отмечены конкретные физические параметры, изменения которых в рамках создания систем управления техническими объектами позволяют добиться наилучших эффектов по улучшению компромиссных решений. Получены аналитические зависимости, позволяющие оценить пределы возможного улучшения показателей качества, разработанная методика активного управления фронтом по интегральным критериям выражена уравнением

$$J_x = [a_{bx}(1/a_{13})^2 + b_{bx}(1/a_{13}) + c_{bx}](1/\varphi) + a_{cx}(1/a_{13})^2 + b_{cx}(1/a_{13}) + c_{cx}$$

$$J_u = [a_{au}(1/a_{13})^2 + b_{au}(1/a_{13}) + c_{au}](1/\varphi)^2 + [a_{bu}(1/a_{13})^2 + b_{bu}(1/a_{13}) + c_{bu}](1/\varphi) + a_{cu}(1/a_{13})^2 + b_{cu}(1/a_{13}) + c_{cu}$$

Впервые дано описание фронта Парето как объекта многокритериальной оптимизации и управления. Рассматривается динамическая система общего вида $X = F(t, \dot{X}, U, A(t))$. Выделяются характерные области, линии и точки, включая области допустимых значений и окрестности равновесной линии, содержащие приемлемые компромиссы (Рисунок 5).

Фронт Парето может быть охарактеризован через некоторые индикаторы

$$\begin{array}{llll}
J_1(X, U, A(t)) \rightarrow \min_{U \in Du}; & J_1(A(t)) \rightarrow \min_{A \in DA}; & I_1(A(t)) \rightarrow \min_{A \in DA}; & \text{Свертка критериев} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \text{— индикаторов} \\
J_n(X, U, A(t)) \rightarrow \min_{U \in Du}; & J_n(A(t)) \rightarrow \min_{A \in DA}; & I_N(A(t)) \rightarrow \min_{A \in DA}; & \Pi(A(\bullet)) \rightarrow \min_{A \in DA};
\end{array}$$

Сформированы следующие индикаторы фронта (Рисунок б):

- ширина (площадь гиперплоскости) фронта или площадь основания гиперконуса l_f ;
- близость к началу координат - высота гиперконуса или радиус – вектор до центра основания конуса или расстояние до точки равновесия по Нэшу ρ_f ;
- наклон фронта Парето φ_f в данной точке как мера соотношения пары критериев.

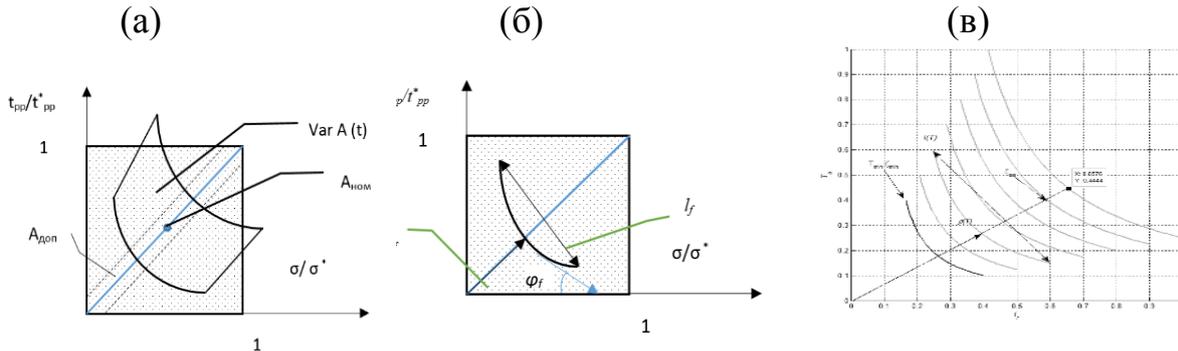


Рисунок 5. Области изменения критериев при вариациях параметров (а), индикаторы фронта Парето (б) и фронт Парето для разных значений постоянной времени T и коэффициента демпфирования ζ (в)

Показано, что фронт Парето имеет все признаки задачи управления, в частности, такие составляющие как наличие объекта или процесса управления, средства управления, настраиваемые параметры или структуры средств управления (Рисунок б).

Предложена трактовка качества фронта в терминах теории управления: «быстродействие» - аналог скорости изменения управляемой величины (параметров фронта) и «близость к желаемому виду», как мера близости фронта Парето к форме, которая устраивает ЛПР.



Рисунок 6. Фронт Парето как объект управления: I_s, I – желаемые и текущие значения индикаторов фронта

Указанные частные критерии, которые предложено называть метакритериями фронта Парето, образуют векторный критерий качества и к ним могут быть применены методы многокритериальной оптимизации, например, построение фронта Парето следующего уровня, т.е. предложена формулировка задачи многоуровневого поиска компромиссных решений.

В диссертации приведен вывод индикаторов фронта Парето для двух взаимно противоречивых критериев времени нарастания и времени переходного процесса управляемого объекта, представленного двухконтурной системой управления. Вводится понятие робастности фронта Парето как неухудшаемость его характеристик при вариациях параметров системы.

Сформулирована и решена задача управления фронтом Парето как задача оптимального управления в предположении, что требуется сужение фронта как увеличение определенности в решении. Осуществлен переход к динамическому фронту Парето. Используем полученную аппроксимирующую зависимость связи функции f_l размаха и отклонений коэффициента демпфирования $\Delta\zeta$ от равновесной точки или полной вариации коэффициента демпфирования:

$$f_l \cong 6\Delta\zeta = 3\Delta\tilde{\zeta}; \quad \zeta_{max} = \zeta_{eq} + \Delta\zeta; \quad \zeta_{min} = \zeta_{eq} - \Delta\zeta; \quad \Delta\tilde{\zeta} = \zeta_{max} - \zeta_{min}$$

Будем управлять размахом $\tilde{\Delta}\zeta$, т.е. $u = \tilde{\Delta}\zeta$.

Постановка и решение задачи управления фронтом в пространстве состояний записывается так:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \quad x = [\rho(T), l(T)]; \quad u = K_\rho \rho + K_l l; \quad \frac{1}{3} \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = q; \quad A = \begin{bmatrix} 3q & 0 \\ 0 & 2q \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 3Tq \end{bmatrix} \\ \Phi &= -K(t)A(t) - A^T(t)K(t) + K(t)B(t)B^T(t)K(t) \\ u_o(t) &= -\frac{2}{3} \frac{1}{T} \pm \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{1}{T}\right)^2 + \Phi} l(t) \quad \frac{dl}{dt} = \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{dt} \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \frac{1}{T} \pm \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{1}{T}\right)^2 + \Phi} \right) l; \quad T = T_0 + T_1 t \end{aligned}$$

Здесь A и B – матрицы свойств объекта и управления, x – вектор состояния, $u = \tilde{\Delta}\zeta$, ζ_{cp} – диапазон вариаций и среднее значение коэффициента демпфирования, u , K_ρ , K_l – закон управления фронтом, и коэффициенты в законе управления, u_o – оптимальный закон управления, t – время, K – матрица решений уравнения Риккати, Φ – весовая функция.

Второй задачей управления фронтом Парето является обеспечение робастности как сохранения значений мета-критериев при изменении параметров основного объекта. Поставлена задача сохранения ширины фронта при вариациях постоянной времени T (независимый параметр) и демпфирования ζ :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dTf_l}{dt} \quad \frac{dl}{dt} = T_1(7.05\Delta^2\zeta + 4\Delta\zeta + 0.03) + (T_0 + T_1t) \frac{d\Delta\zeta}{dt} (14.1\Delta\zeta + 4) = 0.$$

$$f_l = 28.74\Delta^3\zeta - 5.88\Delta^2\zeta + 5.51\Delta\zeta - 0.01 \quad \frac{d\Delta\zeta}{dt} = -\frac{T_1(7.05\Delta^2\zeta + 4\Delta\zeta + 0.03)}{(T_0 + T_1t)(14.1\Delta\zeta + 4)} \cong -\frac{T_1\Delta\zeta}{(T_0 + T_1t)}$$

$$T_s \leq 0,4; \quad \tilde{t}_r \leq 0,4; \quad l \leq l_{max} = 0.2737 \quad T = T_0 + T_1t \quad \Delta T = (l)_{max} / (6\Delta\zeta) - T_{min}$$

Представлено решение задачи формирования упрощенных нелинейных моделей для задач исследования движения летательных аппаратов (ЛА) сложной формы по разработанному усовершенствованному методу нелинейной редукции на основании объединения метода средних Граммианов и метода кусочно-линейной траекторной редукции. Предложена новая формулировка линеаризации как задачи оптимального управления для минимизации ошибки оценки на основе решения уравнения Риккати.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + Bu \quad x = z + x_s \quad \dot{z} = f(z) \quad \dot{z} = (A_0 + \Delta A)z \quad z_1 = z + \Delta z \\ \dot{z}_1 &= (A_0 + \Delta A)(z + \Delta z) \quad \Delta \dot{z} = A_0 \Delta z + B_r u_r \quad u_r = -D \Delta z \quad B_r u_r = -B_r D \Delta z \end{aligned}$$

$$\dot{K}(t) = -K(t)\Delta A(t) - \Delta A^T(t)K(t) + K(t)B(t)R^{-1}B^T(t)K(t) - O$$

$$u_r = -D(t)\Delta z(t); \quad D(t) = R^{-1}B_r^T(t)K(t)$$

$$B_r u_r = -B_r D \Delta z = \Delta A z - f(z) + A_0 z \quad \Delta A = (f(z) - A_0 z + B_r D \Delta z) / z$$

$$\Delta A = \frac{-B_r u_r}{z} = \frac{B_r D \Delta z}{z} = \frac{B_r R^{-1} B_r^T K \Delta z}{z} \quad \Delta A = (f(x) - A_0 x + B_r D \Delta x) / x$$

Разработаны методики применения подходов в редукции нелинейных систем для формирования областей исследований, анализа критериев их качества,

подходов оптимального управления в задачах формирования моделей с оптимальными областями адекватности, алгоритмов многокритериальной оптимизации в задачах построения и оценки областей адекватности.

В Главе 4 представлена разработка новых стратегий организации моделирования, в том числе, имитационного (основной компонент методологии 6 и основная задача 9) для решения фундаментальной и научно-прикладной проблем исследований в рамках создания систем. Используется описанная в главе 2 разработанная новая обобщенная функциональная схема процесса исследования технических систем. Разработаны следующие положения и направления:

1. Локализация областей, в которых ожидается успех многокритериальной оптимизации может происходить через моделирование. Назовем это прямой задачей. Предлагается решить обратную задачу, а именно определить области моделирования через решение задачи многокритериальной оптимизации, в том числе:

2. Формирование нового ансамбля критериев качества моделирования с позиций общей задачи создания и эксплуатации технических систем.

3. Новые методы формирования областей исследований, в рамках формирования пространства входных и выходных параметров, включая детерминированные, нерегулярные и стохастические переменные.

4. Новые подходы к повышению эффективности вычислительных экспериментов, в том числе формирование переменных оптимальных сеток, адаптированных к динамически изменяющимся параметром системы.

5. Обеспечение адекватности и оптимальности моделей в соответствии с разработанной системой критериев адекватности. Формулировка и решение новых задач формирования областей адекватности и оценки их изменения.

Рассмотрена постановка задачи формирования нового ансамбля критериев качества моделирования с позиций общей создания и эксплуатации технических систем и предложена следующая система оценок качества моделей: минимальная сложность в предлагаемых условиях; вычислительная эффективность; надежность и минимизация искажений модели; области адекватности, их оценки, и процессы изменения областей адекватности.

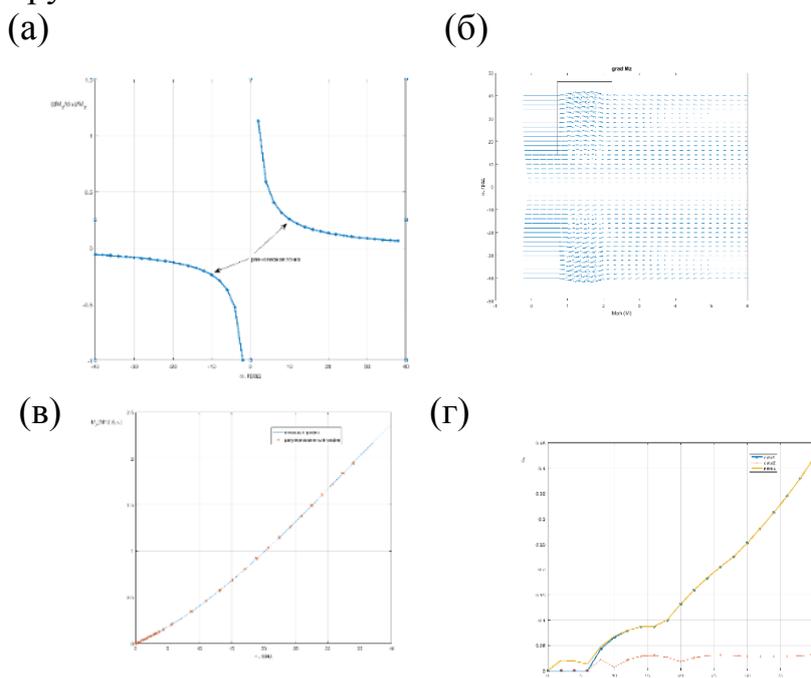
Разработаны следующие методы формирования областей исследований:

- решение задачи зондирования пространства параметров с учетом плотности и других характеристик распределения критериев и индикаторов;
- изучение поведения объектов на границе допустимой области – метод штрафных функций;
- применение технологий DATA Mining (DM) и искусственного интеллекта (ИИ) в формировании областей исследований;
- изменение областей исследования в реальном времени;
- влияние аппаратной реализации (методов) на формирование моделей.

Решена задача повышения эффективности вычислительных экспериментов, в том числе, формирование оптимальной сетки. Оценки проводились по зависимостям отклонений и нормированных квадратических ошибок от показателей укрупнения сеток. Проведены расчеты аэродинамики и динамики технических объектов в виде беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Показано влияние укрупнения сеток на характер изменения основных аэродинамических коэффициентов, в том числе перехода через ноль для моментов

тангажа и коэффициента демпфирования, и отмечено, что при подготовке сетки обязательным условием является выявление областей нахождения системы на границах устойчивости.

Предложена методика обоснованного выбора размеров сеток в многовариантном анализе динамики движения тел, в том числе деформированных, на основании Парето-анализов нормированных ошибок. Выбор смешанных сеток по предложенному подходу позволил значительно сократить количество точек, используемых при формировании массивов данных АДК (Рисунок 7). Окончательным критерием правильности выбора сетки является моделирование динамики движения тела с используемыми сеточными функциями аэродинамических коэффициентов (АДК). Выведены формулы для уравнений в отклонениях, описывающих возмущенное движение вследствие округления сеток.



Окончательным критерием правильности выбора сетки является моделирование динамики движения тела с используемыми сеточными функциями аэродинамических коэффициентов (АДК). Выведены формулы для уравнений в отклонениях, описывающих возмущенное движение вследствие округления сеток. Показано сохранение свойств устойчивости системы с предложенным переменным шагом и даны объяснения изменений периода колебаний тела.

Рисунок 7. Результаты исследований выбора оптимальных сеток: Зависимость относительного градиента от угла атаки с указанием равновесной точки (а), Поле градиентов моментов тангажа (б), Результаты применения смешанной сетки (в), Ошибки расчетов коэффициента момента тангажа, усредненные по числам Маха (г)

Показано сохранение свойств устойчивости системы с предложенным переменным шагом и даны объяснения изменений периода колебаний тела.

Предложены десять подходов к исследованию областей адекватности моделей движения в динамической постановке, в том числе, использование методов оптимизации общего вида, адаптация методов теории управления, стохастические методы оценки адекватности методы классификации, кластеризации, регрессионного анализа, применение построения линий уровня для оценки областей адекватности и др. Полное описание подходов представлено в диссертации. Критериями явились невязки параметров модели в виде динамических коэффициентов, невязки реакций системы в неуправляемом и

управляемом случаях, индикаторы состояния в рамках прогнозного обслуживания, энергетический критерий – Граммиан управляемости системы. Плодотворным признано применение индикаторов состояния, которые обычно используются для оценки повреждений системы.

Применение методов и критериев проверено на задаче формирования разработанных автором моделей БПЛА, оценке их адекватности, выявления изменения этих областей в процессе движения (Рисунок 8).

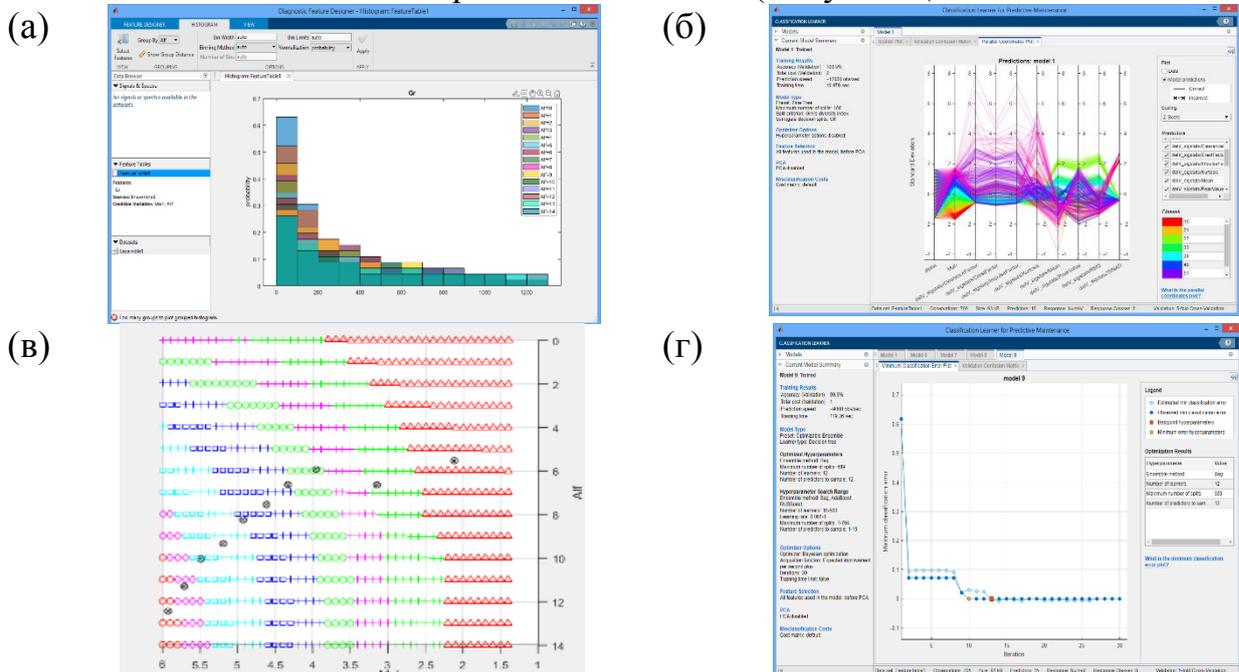


Рисунок 8. Результаты определения областей адекватности: результат работы классификатора в виде диаграммы (а), результат оценки предсказаний динамических областей при использовании параллельных координат (б), кластеризация Граммиана управляемости (в), результат обучения классификатора(г)

Приведен описание и других разработанных методов, такие как, адаптация нейросетевых алгоритмов и других методов интеллектуального анализа данных алгоритмов к оценке областей адекватности, применение методов временных рядов для оценки адекватности.

Приводится постановка фундаментальной проблемы новой трактовки метода аналогий и разработка на основе ее решения новых методов моделирования. Главное отличие предлагаемого подхода: использование метода аналогий не только для объектов разной физической природы, а перенос особенностей процессов функционирования систем на процесс исследования систем. На основании разработанного метода предложена вторая идея, которая может выступать и как самостоятельная и как его конкретное воплощение, а именно, перенос идей управления объектами на управление моделями и критериями.

Среди разработанных методов методы аналогий в исследовании процессов обтекания и планирования движения, аналогии критических точек при обтекании тел, критических точек достижения пороговых значений и эффектов сжимаемости в пространстве критериев, использование идей матричного описания геометрии деформированных тел: аналог коэффициента давления и использование криволинейной системы координат, применение энергетического подхода к

задаче зондирования пространства параметров. Показана возможность перенесения методов оценки устойчивости систем на проблемы устойчивости критериев. Описан подход к применению методов POD (подходящие ортогональные разложения) для зондирования пространства параметров. Показана возможность перенесения технологии планирования действий на технологии планирования моделирования. Дается описание таких разработанных методов, как как аналог моментов инерции в теории и многокритериальной оптимизации и моделирования, использование метода периодограммы для организации зондирования пространства параметров. В качестве объекта исследований выбраны БПЛА разных типов и назначений.

Предложены пути модификация методов визуализации в параметрических исследованиях систем управления. Даны результаты разработки новых подходов к визуализации многокритериальных функций.

В **Главе 5** рассмотрено развитие и практическое применение общей методологии для решения 2 и 3 задач фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной системе, а также и научно-прикладных проблем диссертации в рамках эксплуатации систем, в том числе, для разработки методов исследования физических повреждений объектов предметной области, нарушений в работе их информационных систем, формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, надежности и прогнозирования систем управления техническими объектами (основные задачи 11,12,13 и основные компоненты методологии 8, 9 и 10).

Решены следующие задачи:

- разработана классификации индикаторов состояния;
- введены в рассмотрение новые индикаторы;
- показана связь индикаторов состояния и критериев качества функционирования системы;
- сформулирована задача многокритериальной оптимизации индикаторов состояния и критериев качества;
- сформулирована задача выбора критериев и индикаторов надежности;
- предложено решение задачи многокритериальной оптимизации индикаторов надежности (Рисунок 9).

Введено понятие пользы или критерия качества самого индикатора.

Рассмотрены примеры применения разработанных методов для определения надежности и выбора состава композитных материалов для изготовления элементов БПЛА (Рисунок 9). Показаны линии уровней для критериев снижения адгезионной прочности и снижения вязкости разрушения в конечный момент времени (а), оптимизация рангов (б), результат суперпозиции критериев (в).

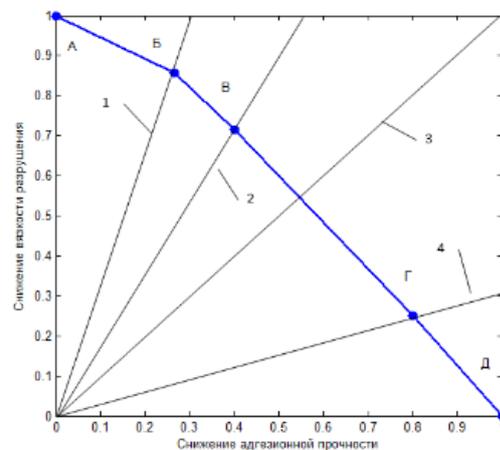


Рисунок 9. Примеры применения разработанных методов для определения надежности и выбора состава композитных материалов

На рисунке 10 показан разработанный процесс исследования повреждений. Разработанные методы были применены к исследованиям моделей БПЛА роторного и самолетного типов (рисунки 11, 12).

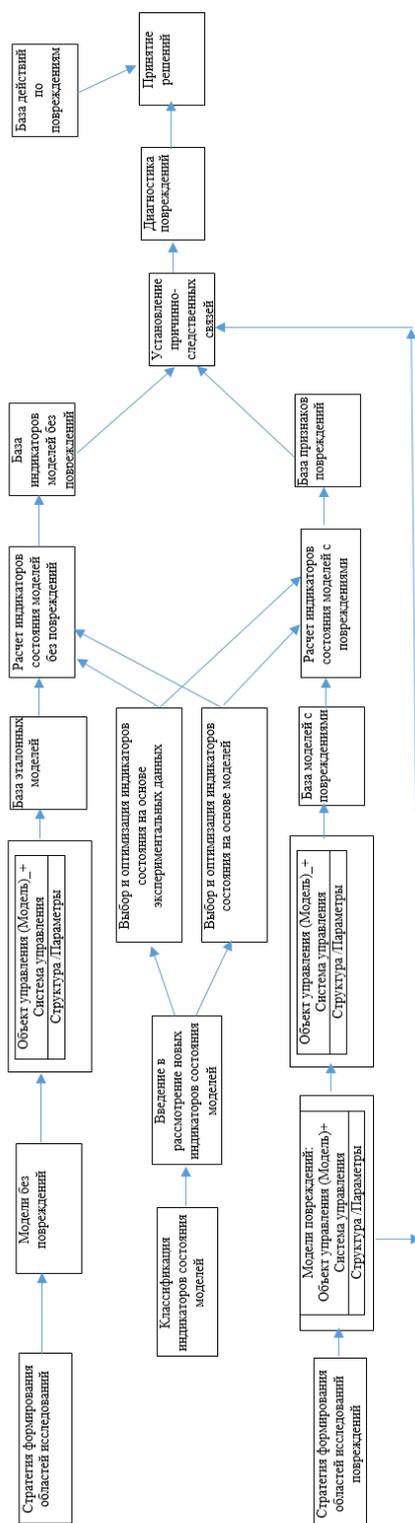


Рисунок 10. Процесс исследований состояний и повреждений технической системы

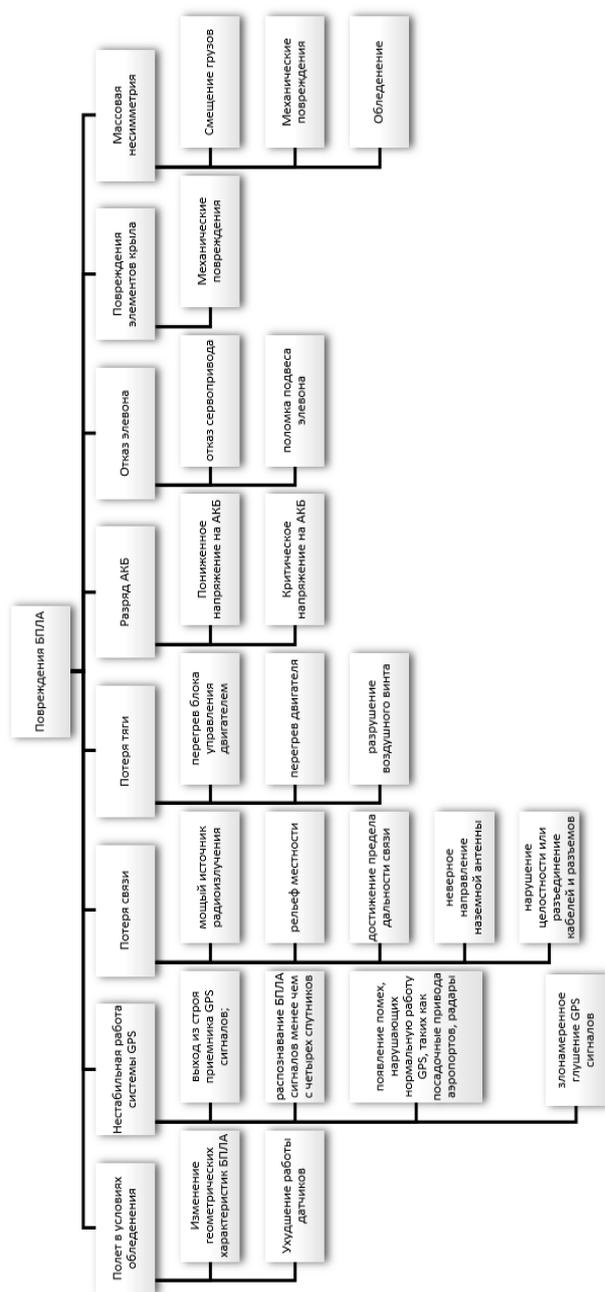


Рисунок 11. Анализ повреждений для БПЛА

Решаются две задачи фундаментальной научной проблемы при действии внешних и внутренних изменяющихся факторов – параметров и структур (причина) оценки состояния системы (следствие) в реальном времени и прогноза состояния системы (следствие).

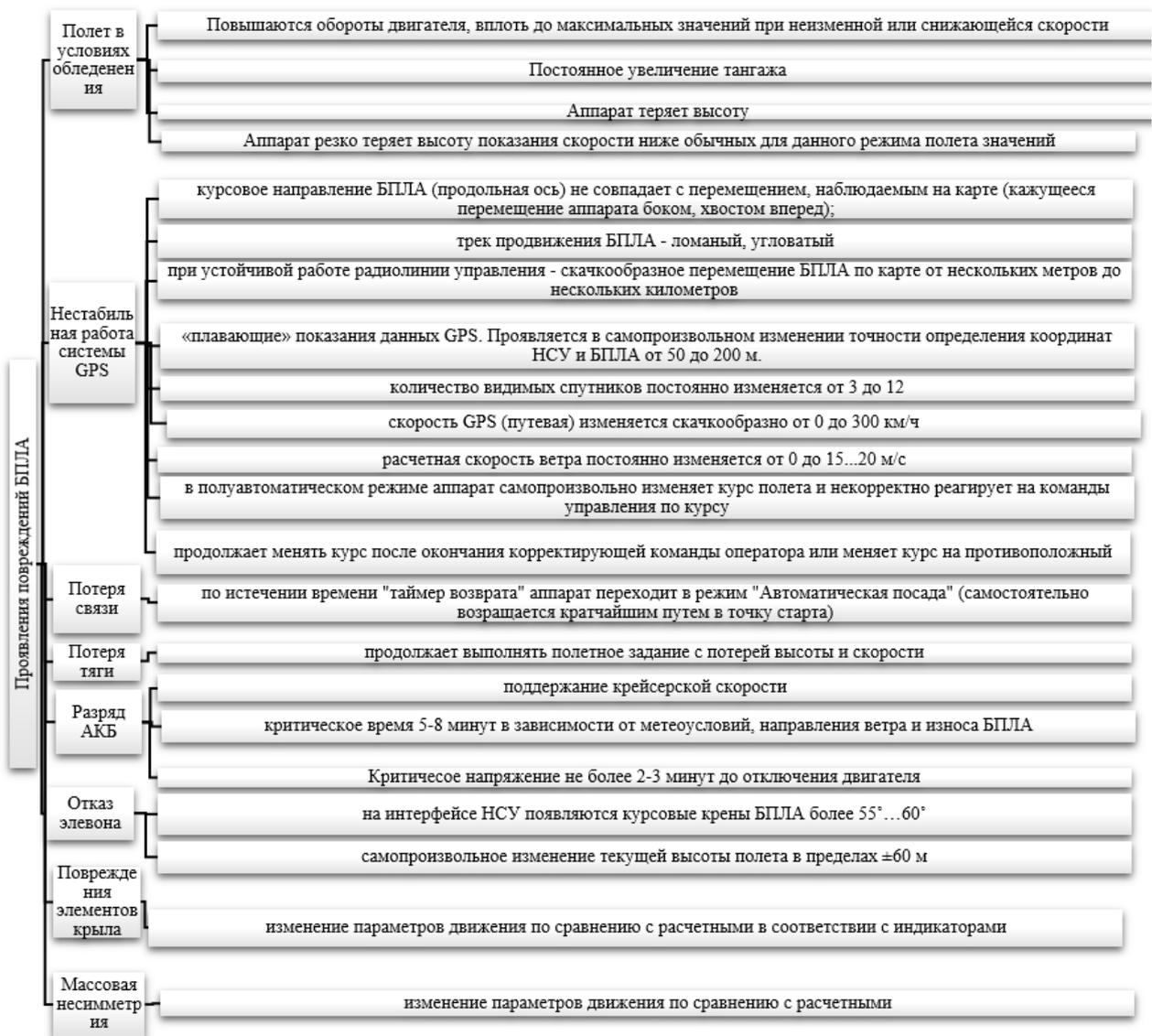


Рисунок 12. Анализ признаков повреждений БПЛА

Был разработан графический интерфейс для многовариантных анализов и установления причинно-следственных связей (Рисунок 13).

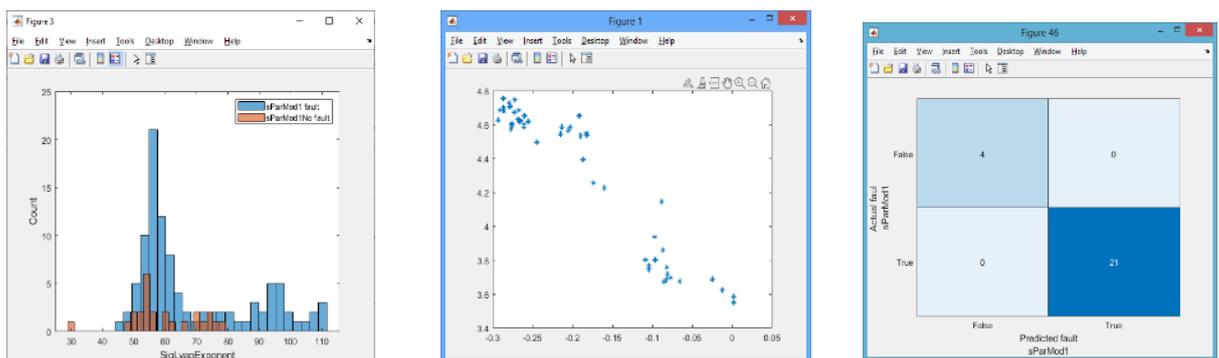


Рисунок 13. Результаты многовариантных анализов влияния повреждений

Представлена разработка новых методов исследования и диагностики повреждений технических объектов предметной области, включая аналитические методы. Отмечено, что для разработки методов исследования и диагностики повреждений ЛА необходимо разработать набор моделей, опираясь как на математические, так и на физические аспекты функционирования прототипов.

Приведено описание разработанного матричного метода описания геометрии и расчета аэродинамических характеристик тел с произвольно искривленной осью. Основные формулы метода приведены в Приложении П1.4.

Показан результат параметрических исследований динамики некоторых видов, деформированных тел. Проведенные многовариантные исследования позволили определить основные тенденции влияния деформаций и определить круг проблем, которые следует исследовать на аналитических моделях с целью выявления закономерностей, в частности характерных областей влияния параметров на характеристики движения.

Решена задача моделирования устойчивости движения деформированных удлиненных тел на основе вариаций угловых скоростей крена (Рисунок 14).

$$X_1 Y_1 = -K \quad K = K_0 \bar{\omega}_x^2; \quad X_1 = X + A \mu \bar{\omega}_x^2; \quad X = \bar{m}_z^\alpha; \quad Y_1 = Y + B \mu \bar{\omega}_x^2; \quad Y = \bar{m}_y^\beta;$$

$$K_0 = \left[\left(\bar{m}_y^{\bar{\omega}_y} + \frac{c_{za}}{2} \right) + B \left(-\frac{1}{2} c_y^\alpha + \frac{c_{za}}{2} \right) \right] \cdot \left[\left(\bar{m}_z^{\bar{\omega}_z} + \frac{c_{za}}{2} \right) + A \left(\frac{c_z^\beta}{2} + \frac{c_{za}}{2} \right) \right]$$

$$(X + a_1 \bar{\omega}_x^2)(Y + b_1 \bar{\omega}_x^2) + c_1 \bar{\omega}_x^2 = 0; \quad X = f(\bar{i}_y, \bar{i}_x, \bar{K}, \bar{x}_{\text{зад}}); \quad Y = f(\bar{i}_y, \bar{i}_x, \bar{K}, \bar{x}_{\text{зад}});$$

$$a_1 = A \mu; \quad b_1 = B \mu; \quad c_1 = K_0.$$

Здесь α и β - углы атаки и скольжения, μ - плотность тела, $\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$ - безразмерные угловые скорости, $\bar{i}_x, \bar{i}_y, \bar{i}_z$ безразмерные моменты инерции.

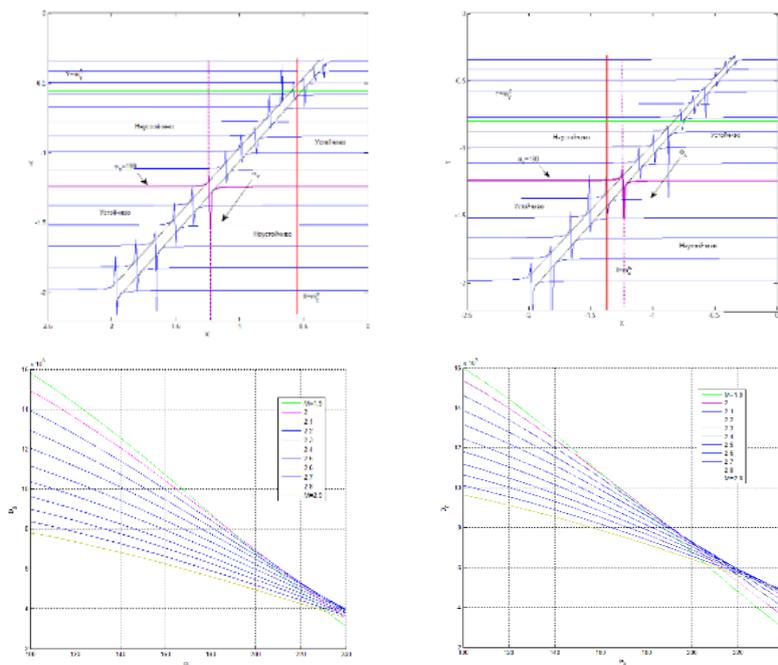


Рисунок 14. Границы устойчивости и совместное влияние числа Маха и угловой скорости на коэффициент $D_0(\bar{\omega}_x^2)$ для прямого и деформированного тела

Изложены теоретические основы расчета исследования влияния деформаций и асимметрии на параметрический резонанс продольных и боковых колебаний деформированного тела. Показана также возможность прямого решения нелинейного относительно определяющих параметров уравнения, что позволит получать зависимости критических скоростей крена и диапазонов устойчивости от этих параметров.

$$\omega_{\beta 0} = \sqrt{-\bar{\sigma}_\beta(\alpha_0)} \quad \omega_{\alpha_0}^2 = M_z / (J_z \alpha) = \bar{M}_z^\alpha \quad \Delta \ddot{\alpha} + \omega_{\alpha_0}^2 \Delta \alpha = 0$$

$$\ddot{u} + 2 \zeta_\beta \dot{u} + \omega_{\beta_0}^2 [1 + a \cos \omega_{\alpha_0} t] u = 0 \quad a = (K + \kappa_{np} - \kappa_{np} \omega_{\alpha_0}^2 / (2 \omega_{\beta_0}^2)) \Delta \alpha_{\text{max}}$$

Численные расчеты, проведенные для прямого и искривленного тел показали, что искривление тела оказывает существенное влияние на смещение линий $X = \bar{m}_z^\alpha = -a_1 \bar{\omega}_x^2; Y = \bar{m}_y^\beta = -b_1 \bar{\omega}_x^2$; по сравнению с прямым телом, которое остается внутри границ устойчивости при вариациях угловых скоростей по крену. Искривление тела приводит к сдвигу седловой точки в сторону увеличения угловой скорости и увеличения по абсолютной величине производной \bar{m}_y^β . Была разработана аналитическая модели и проведены численные исследования устойчивости деформированных тел, исследование влияния деформаций и асимметрии на параметры движения ЛА (Рисунки 15, 16)

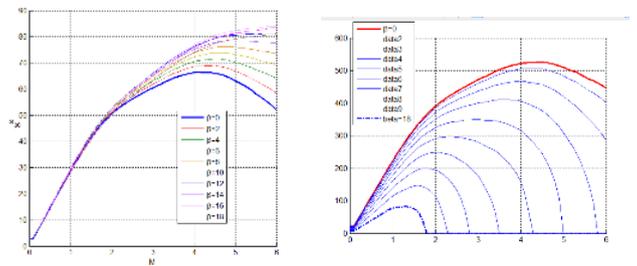


Рисунок 15. Изменение частоты боковых колебаний: $K=0, 0,028$

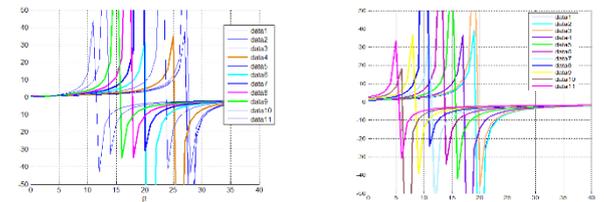


Рисунок 16. Проверка условий резонанса продольных и боковых колебаний

Описаны разработанные подходы к выявлению изменения формы летательных аппаратов в процессе движения. Предложены общая классификация методов анализа, отдельные классификации для многоцветных и одновцветных БПЛА, три класса индикаторов состояния для выявления повреждений. Определены методы и средства определения индикаторов деформации беспилотных летательных аппаратов как в общей постановке, так и применительно к исследуемому классу деформированных тел.

Показано решение вспомогательных задач моделирования в рамках определения эффективных индикаторов. Отмечены перспективы использования DATA Mining в рамках изучения проблем повреждения БПЛА. Представлены результаты обработки в рамках описательных статистик для многовариантного анализа при вариации начальных условий для разной степени деформации (Рисунки 17, 18).

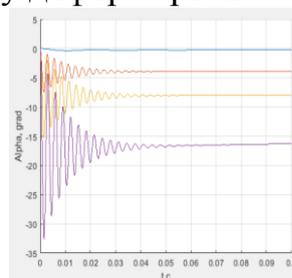


Рисунок 17. Влияние деформаций на параметры движения тела

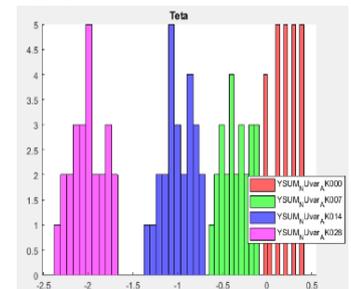


Рисунок 18. Влияние начальных условий на параметры движения деформированных тел

Рассмотрены особенности интеллектуального анализа данных, позволяющие обеспечить его активное применение к задаче выявления повреждений. Для изучаемой проблемы выделены четыре главных фактора, подлежащие анализу. Определены этапы решения проблемы выявления повреждений с учетом использования передовых информационных технологий.

Проведено многократное моделирование движения нормальных и поврежденных аппаратов, претерпевших как изменение формы корпуса, так и искажения показаний датчиков вследствие обледенения. Расчеты проводились как для детерминированных, так и для случайных характеристик повреждения элементов исследуемого объекта, причем рассматривались не только независимые, но и перекрестные сочетания для формы объекта и датчиков. Было протестировано около 30 индикаторов состояния и выявлены наиболее надежные показатели наличия повреждений как для изменений формы, так и для искажений показателей датчиков (Рисунок 19). Показана способность оценивать наличие повреждений на основе расчетов индикаторов по результатам измерений угловых скоростей, наклона траектории и углов атаки.

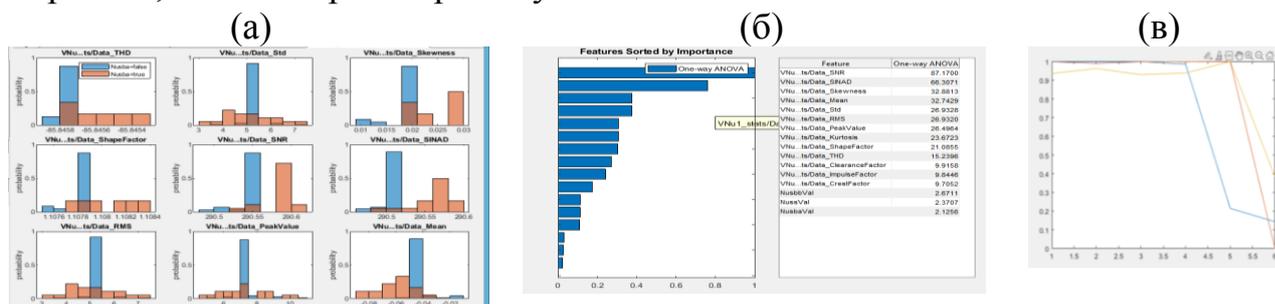


Рисунок 19. Создание признаков (индикаторов) исследуемых сигналов – фазовых координат системы (а), гистограмма выбранного индикатора, ранг индикаторов (в), свертка индикаторов

Предложено использовать три класса индикаторов: индикаторы на базе описательной статистики, перенесение средств решения задачи многокритериальной оптимизации на задачи определения повреждений, использование средств визуализации, в том числе, применяемых при визуализации задачи многокритериальной оптимизации при числе критериев больше двух.

На основе выбора индикаторов предлагается выполнять следующие виды анализов, которые могут проводиться во временной области, в частотной области, в частотно-временной области: спектральные характеристики; описательные статистики, конкретный вид зависит от исследуемого повреждения; свертка нескольких функций в одном эффективном критерии при сравнении эталонных и реальных процессов по аналогии с решением задачи многокритериальной оптимизации (МКО). Отмечены главные факторы, подлежащие анализу и изучению в рамках применения технологий интеллектуального анализа данных в задачах выявления повреждений беспилотных летательных аппаратов.

Анализ уязвимостей также были проведены на примере робототехники, а именно задач группового управления роботами и навигации.

В результате проведенных исследований были выполнены все этапы, отмеченные на рисунке 10.

Итогом работ, описанных в главах 2-5 явилось также решение задачи формирования ансамбля новых критериев качества системы в целом, в том числе:

- Робастность и адаптивность критериев.
- Техническая реализуемость как один из обобщенных критериев и области реализуемости.
- Остаточный срок службы как критерий.
- Степень компенсации: энергетический критерий.

- Критерий внезапности наступления события и критерий предотвращения отказов.
- Свойства изолированности отдельных областей критериев
- Робастность: верхняя и нижняя границы.
- Робастность - гибкость и устойчивость - управляемость как пары противоречивых критериев.
- Плотность распределения критериев.

В **Главе 6** описано практическое применение методологии и оценка технико-экономических показателей ее эффективности к реализациям систем управления техническими объектами и их составных частей.

Подробное описание технических объектов, которые исследовались с применением разработанной методологии дано в Приложении, в том числе: проект группового управления и его особенности, проект БПЛА самолетного типа, проект БПЛА роторного типа, проект деформированного ЛА с базовой осесимметричностью (Рисунок 20), проект ЛА с базовой осесимметричностью и блоком управления, проект многокритериальной оптимизации в композитных материалах.

Отмечены направления проведенных исследований по каждой из моделей в соответствии с разработанной методологией.

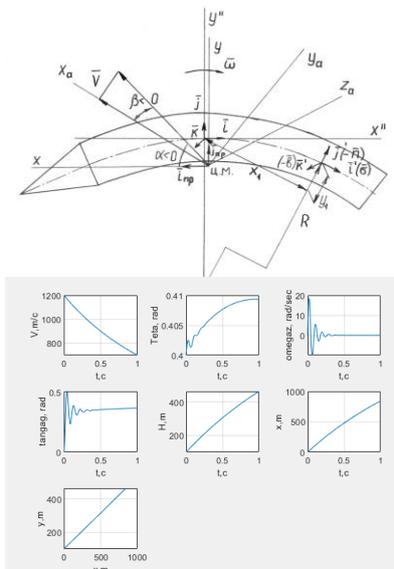


Рисунок 20. Объект № 4: общий вид модели и результаты моделирования

Предложено решение задачи логистики на основе объединения методов многокритериальной оптимизации и интеллектуального анализа данных, оптимизация планирования пути, оптимизация в задачах навигации и локализации.

Дано подробное описание применения разработанной методологии создания и эксплуатации систем управления техническими объектами на основе объединения и развития технологий, многокритериальной оптимизации, моделирования и методов интеллектуального анализа данных как единой концепции в нескольких сферах:

- задачи, многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных в разработке композитных материалов;
- задачи моделирования для отработки программ МЛМ в составе РС МКС.
- Новые стратегии моделирования сложных систем на основе современных информационных технологий были протестированы на примере группового управления (реализация специальной программы магистраты по ПНР групповое управление гетерогенными роботами).

- Для формирования целостной картины использован универсальный прием: методы исследования объектов должны быть адекватны исследуемым объектам.

Для всех исследуемых объектов также был выполнен синтез управления на основании разработанных моделей.

Делается вывод о том, что все пункты исследований, отмеченные на схеме рисунка 1, выполнены. В диссертации приведены результаты расчетов эффективности применения методологии. В заключение дана краткая характеристика основных научных и практических результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ существующих методов, методических и алгоритмических средств многокритериальной оптимизации и моделирования технических объектов и их систем управления и новых технологий интеллектуального анализа данных позволил выявить проблемы и определить цель исследований, связанную с созданием методологии создания и эксплуатации систем управления техническими объектами на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных.

2. Сформулирована фундаментальная проблема установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе, являющаяся основанием для разработки принципов и основных составляющих разрабатываемой методологии и достижения научно-практических целей работы.

3. Определены принципы и основные составляющие методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии, многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных и их место в жизненном цикле технических систем и решении фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе применительно к поставленной цели исследований, создания эффективных механизмов формирования новых внутренних связей между тремя технологиями.

4. Сформулирована и решена проблема размерности и места многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной и прикладной научных проблем. Поставлена и решена задача разработки ансамблей критериев качества, включая метакритерии, соответствующих разрабатываемой методологии на этапах создания и эксплуатации технических систем.

5. Разработана обобщенная структурная схема процесса исследования технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной и прикладной научных проблем.

6. Поставлена и решена задача разработки общего теоретического подхода к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и прогнозирования как задач управления. Решение этой задачи, в том числе постановка и решение задачи управления фронтом Парето как объектом многокритериальной оптимизации и управления позволило определить конкретные направления изменения параметров системы при сохранении качества принимаемых решений, усилить обоснованность требований к критериям, сократить общее число вычислений до 200 раз.

7. Решение задач разработки составных части методологии позволило сформировать новую систему критериев качества моделирования, новые стратегии организации процесса моделирования, в том числе методы формирования областей исследований, оценок адекватности, критерии и методы повышения эффективности вычислительных экспериментов с позиций общей задачи повышения качества создания и эксплуатации технических систем.

8. Решение фундаментальной проблемы новой трактовки метода аналогий позволило разработать методологические аспекты новой формулировки метода аналогий для решения задач моделирования, в том числе применение аналогий между методом исследований одного объекта и функционированием объекта иной физической природы, которые дают теоретическую и практическую основу для разработки новых методов моделирования в разных сферах разработки технических приложений.

9. Поставленная и решенная задача формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования технических объектов предметной области на этапе создания и эксплуатации позволила повысить обоснованность оценок состояния и принятия решений.

10. Разработанные новые методы исследования, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области, реализующие решение фундаментальной задачи установления причинно-следственных связей в системах, включая аналитические методы и методы на основе интеллектуального анализа данных позволили повысить качество функционирования и прогнозирования в технических системах позволили для повреждений не катастрофического характера формировать законы управления по текущему состоянию, для повреждений, приводящих к катастрофическим последствиям, оперативно вмешиваться в ситуацию и сохранить объект путем своевременного прекращения движения.

11. Для разработанных положений методологии была проведена оценка технико-экономических показателей эффективности результатов их применения к реализациям систем управления техническими объектами и их составных частей, в частности Количество узлов для хранения информации снизилось с 41 до 17 по одному измерению. Таким образом, сокращение объема хранимой информации сократилось в 4 раза. Количество обращений к обновленной информации сократилось в 2.5 раз, сократив время вычислений по тестовой задаче в 40 раз.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Romanova I.K. Development of a New Concept of Modeling Systems Based on the Application and Development of Modern Information Technologies // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.030001-1-030001-9. doi.org/10.1063/5.0074539 (0,65 п.л.).

2. Romanova I.K. Applying Intelligent Data Analysis Technologies for Detecting Damages to UAVs // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.030004-1-030004-8. doi.org/10.1063/5.0074541 (0,56 п.л.)

3. Romanova I.K. Integration of IoTs security concepts and technical systems diagnostics // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.030020-1-030020-11. doi.org/10.1063/5.0074550 (0,75 п.л.).

4. Romanova I.K. Linearization and Simulation of Two-Temp Systems // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.020001-1-020001-10. doi.org/10.1063/5.0074534 (0,69 п.л.)
5. Romanova I.K., Mei Yingfei. Modern Methods for Solving Unmanned Navigation Problems in Unknown Environments // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.030007-1-.030007-10. doi.org/10.1063/5.0074545 (0,69/0,5 п.л.)
6. Romanova I.K., Mei Yingfei. Solving the Localization Problem While Navigating Unknown Environments Using the SLAM Method // AIP Conference Proceedings // 2022. Vol. 2383. P.030008-1-030008-11. [/doi.org/10.1063/5.0074547](https://doi.org/10.1063/5.0074547).(0,75/ 0,5 п.л.)
7. Romanova I. K, Shchurikhin A. A. Problems of using a tracked robot in group control of heterogeneous robots // 2022. Vol. 2383. P.030005-1-030005-7. doi.org/10.1063/5.0074544. (0,5/0,3 п.л.)
8. Romanova I.K., Chernyshov N.M. Analysis of technical solutions for manipulators for designing a manipulator with a variable number of links // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.030009-1-030009-7. doi.org/10.1063/5.0074832 (0,5/0,3 п.л.)
9. Romanova I.K., Chernyshov N.M. Low-level control algorithms for manipulator with variable number of links // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2383. P.030018-1-030018-9. doi.org/10.1063/5.0074833 (0,625/0,4 п.л.)
10. Romanova I.K. Modern approaches to detecting changes in shape and other damage to flight vehicle during movement. // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318. P. 110001-1-110001-8. <https://doi.org/10.1063/5.0036045>. (0, 5 п.л.)
11. Romanova I.K. Pareto optimal solutions and their application in designing robots and robotic systems // Studies in systems, decision and control. Springer Nature Switzerland. 2020. Vol. 272. P.25-39.(0,94 п.л.)
12. Romanova I.K. Study of the influence of deformations and asymmetry on aircraft movement parameters // AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists - Pioneers of Space Exploration. 2019. Vol. 2171. P.130001 – 130001-8. doi.org/10.1063/1.5133268 (0,5 п.л.)
13. Romanova I.K. Multi-objective optimization of dynamic systems and problem of the Pareto front control // AIP Conference Proceeding. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists. 2019. Vol. 2171. P.110016 – 110016-9. doi.org/10.1063/1.5133250.(0,63 п.л.)
14. Romanova I.K. Linearization and reduction: two approaches to the formation of models of dynamic systems // AIP Conference Proceedings. International Scientific and Practical Conference "Modeling in Education 2019". 2019. Vol. 2195. P.020078 – 020078-9. doi.org/10.1063/1.5140178 (0,63 п.л.)
15. Romanova I.K., Chernyshov N.M. Synthesizing the control system of the robotic center scraper for cleaning trunk pipelines // AIP Conference Proceedings. International Scientific and Practical Conference "Modeling in Education 2019". 2019. Vol. 2195. P.020028-1-020028-7 doi.org/10.1063/1.5140128 (0,5/0,3 п.л.)
16. Romanova I.K., Alaverdyan R. Automated robotic system for autism treatment // AIP Conference Proceedings. International Scientific and Practical

Conference "Modeling in Education 2019". 2019. Vol. 2195. P. 020016-1 - 020016-7. <https://doi.org/10.1063/1.5140116>. (0,5/0,3 п.л.)

17. Романова И.К. Моделирование устойчивости движения деформированных удлиненных тел на основе вариаций угловых скоростей крена // ТРУДЫ СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 3. С. 646-676. (1,94 п.л.)

18. Borodulin A.S., Malysheva G.V., Romanova I.K. Optimization of rheological properties of binders used in vacuum assisted resin transfer molding of fiberglass // Polymer Science. Series D. 2015. Vol. 8. No 4. P. 300-303. (0,25/0,1 п.л.)

19. Maung P.P., Malysheva G., Romanova I. Optimization of the rheological properties of epoxy resins for glass and carbon reinforced plastics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4th International Conference on Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications, АСМТАА 2015. 2016. С. 012006.(0,6/ 0,2 п.л.)

20. Романова И.К. Сравнительный анализ и модификации методов визуализации в параметрических исследованиях систем управления // Наука и Образование: Научное Издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 1. С. 50-76. (1,94 п.л.)

21. Романова И.К. Основные подходы к выбору состава материала путем многокритериальной оптимизации // Все материалы. Энциклопедический Справочник. 2017. № 7. С. 14-18.(0,3 п.л.)

22. Романова И.К. Повышение эффективности вычислительных экспериментов при моделировании движения летательных аппаратов // Наука и Образование: Научное Издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 7. С. 158-188. (2,31 п.л.)

23. I.K. Romanova. Modern methods of multidimensional data visualization: analysis, classification, implementation, and applications in technical systems. Science & Education. 2016. № 03. С. 133.

24. Романова И.К., Соловьев В.С. Параметрические исследования динамики некоторых видов деформированных тел. Ч.1 // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 5-6. С. 90 – 97.(0,38/0,22 п.л.)

25. Романова И.К., Соловьев В.С. Параметрические исследования динамики некоторых видов деформированных тел. Ч.2 // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 7-8. С. 82 – 89. (0,38/0,22 п.л.)

26. Романова И.К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложения в технических системах // Наука и Образование: Научное Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 3. С. 133-167.(2,19 п.л.)

27. Романова И.К. Постановка задачи управления фронтом Парето и ее решение в анализе и синтезе оптимальных систем // Наука и Образование: Научное Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 8. С. 140-170.(1,94 п.л.)

28. Романова И.К. Об одном подходе к определению весовых коэффициентов метода пространства состояний // Наука и Образование: Научное Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 4. С. 105-129. (1,56 п.л.)

29. Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние объекта, при решении задач надежности// Ремонт, Восстановление, Модернизация. 2015. № 6. С. 33 – 38.(0,38/0,22 п.л.)
30. Романова И.К. Применение аналитических методов к исследованию Парето - оптимальных систем управления // Наука и образование: Научное Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 4. С. 238-266.(1,81 п.л.)
31. Романова И.К. Применение алгоритмов вычисления Парето-оптимальных точек для визуализации 3D при нерегулярном изменении аргументов // V международная научно- практическая конференция «Современные концепции научных исследований». М. 2014. № 6. С. 29-34.(0,38 п.л.)
32. Романова И.К. Формирование упрощенных нелинейных моделей для задач исследования движения тел сложной формы // Инженерный Вестник (МГТУ им. Н. Э. Баумана). Электронный журнал. 2013. № 10. С. 581-594. (0,88 п.л.)
33. Романова И.К. Проблема устойчивости в теории и практике формирования моделей динамических систем // Инженерный Журнал: Наука и Инновации. Издательство: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. М. 2013. № 8 (20). С.1-12. (0,75 п.л.)
34. Романова И.К. Современные методы редукции нелинейных систем и их применение для формирования моделей движущихся объектов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия "Машиностроение". 2012. Спец. выпуск "Специальная робототехника и мехатроника". С. 122 – 133. (0,75 п.л.)
35. Романова И.К. Соловьев В.С. Разработка матричного метода описания геометрии и расчета аэродинамических характеристик тел с произвольно искривленной осью // Наука и Образование: Научное Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11. С.1-12. DOI: 10.7463/1112.0492155. (0,75 п.л./0, 5 п.л.)
36. Романова И.К. Соловьев В.С. Исследование особенностей аэродинамики искривленных тел // Наука и Образование: Научное Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11. С.1-39.(2,5/2,0 п.л.)
37. Романова-Большакова И.К. Многокритериальная оптимизация выбора индикаторов состояния и надежности объектов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. М., 26–27 октября 2021 г. С. 204-217 (0,88 п.л.)
38. Романова-Большакова И.К. Построение и определение динамических характеристик областей адекватности моделей // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. М., 26–27 октября 2021 г. С. 218-239 (1,38 п.л.)
39. Романова-Большакова И.К. Разработка методов моделирования на основе аналогий // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. М., 26–27 октября 2021 г. С. 240-258 (1,19 п.л.)
40. Романова-Большакова И.К., Полешиков Е.В. Колесно-шагающий робот с изменяемой конфигурацией и адаптивным управлением // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII

Всероссийской научно-практической конференции. М., 26–27 октября 2021 г. С. 259-271 (0,81/ 0, 5 п.л.)

41. Романова-Большакова И.К. Применение технологий интеллектуального анализа данных в задачах выявления повреждений беспилотных летательных аппаратов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. М., 26–27 октября 2021 г. С. 272-280 (0,56 п.л.)

42. Романова-Большакова И.К., Филимонов А.С., Чернышов Н.М. Автоматизация процессов постобработки деталей и материалов, созданных с помощью технологии селективного лазерного спекания // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. М. 26–27 октября 2021 г. С. 281-291 (0,69/ 0, 3 п.л.)

43. Авдейчиков Д.А., Романова-Большакова И.К. Адаптивные методы биопротезирования на основе мягкой робототехники. Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. М. 26–27 октября 2021 г. С. 3-7. (0,31/ 0, 2 п.л.)

44. Романова И.К. Современные подходы к выявлению изменения формы летательных аппаратов в процессе движения // XIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. М. 2020. С. 707-711. (0,31 п.л.)

45. Романова И.К. Разработка новой концепции моделирования систем на основе применения и развития современных информационных технологий // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. М. 2020. С. 401-410.(0,63 п.л.)

46. Романова И.К. Применение технологий интеллектуального анализа данных в задачах выявления повреждений беспилотных летательных аппаратов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. М. 2020. С. 393-400. (0,5 п.л.)

47. Романова И.К. Линеаризация и моделирование двухтемповых систем // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. М. 2020. С. 381-392. 0,75 п.л.)

48. Романова И.К. Интеграция концепций безопасности интернета вещей и диагностики технических систем // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. М. 2020. С. 371-381. (0,69 п.л.)

49. Романова И.К. Применение современных информационных технологий в формировании компетенций коллективного проектирования на примере группового управления гетерогенными роботами // Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения. Сборник трудов Международного форума. М. 2020. С. 343-346.(0,25 п.л.)

50. Романова И.К. Методологические аспекты применения программного обеспечения в преподавании инженерных дисциплин: задачи, проблемы и перспективы // Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения. Сборник трудов Международного форума. М. 2020. С. 339-343.(0,31 п.л.)

51. Романова И.К. Методология применения интеллектуального анализа данных в технических приложениях // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции. М. 2018. С. 124-133. (0,63 п.л.)

52. Романова-Большакова И.К. Программный комплекс для моделирования управляемого пространственного движения летательного аппарата при наличии асимметрии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661774 от 27.06.2022 г.

53. Романова-Большакова И.К. Программный комплекс для моделирования, анализа и синтеза управляемого пространственного движения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) роторного типа в условиях действия внешних и внутренних возмущений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2022661636 от 23.06.2022

54. Романова-Большакова И.К. Программный комплекс для исследования динамики деформированного неуправляемого летательного аппарата с шестью степенями свободы и произвольной формой продольной оси. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2022661637 от 23.06.2022

55. Романова-Большакова И.К. Программный комплекс для моделирования и интеллектуального анализа полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа в условиях действия внешних и внутренних возмущений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661458 от 22.06.2022 г.

56. Романова И.К. Оптимизация параметров и структуры регулятора. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610401 от 10 января 2012 г.

57. Романова И.К. Программный комплекс «Многокритериальная оптимизация систем управления». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610400 от 10 января 2012 г.

58. Романова И.К. Программный комплекс кинематических исследований траекторий наведения летательных аппаратов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616656 от 25 августа 2011 г.

59. Романова И.К. Программа для параметрического анализа динамики систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009612667 от 27 мая 2009 г.

Переводные работы, входящие в международные базы данных World of Science и Scopus: [1-19]. Работы, опубликованные в журналах из списка ВАК [20-36]. Труды конференций [37-51]. Патенты и свидетельства [52-59]