

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

**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 имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**Научный консультант** доктор технических наук, профессор РАН  
**Мещеряков Роман Валерьевич**

**Официальные оппоненты:**

**Андреева Ольга Николаевна**, доктор технических наук, Акционерное общество Концерн «Моринформсистема-Агат», г. Москва, заместитель руководителя научно-методического центра по научной работе -начальник отдела научной работы.

**Бобырь Максим Владимирович**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, кафедра вычислительной техники, профессор.

**Гончаренко Сергей Николаевич**, доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра автоматизированных систем управления, профессор.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 20.06.2023 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Ученый секретарь диссертационного совета,

к.т.н., доцент

И.В. Муратов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Повышение технического уровня, эффективности и качества функционирования технических объектов и их систем управления является традиционно актуальной проблемой, однако в последние годы формируются процессы, связанные с усложнением их структуры, условий эксплуатации, усиления требований качества функционирования и экономичности, что является проявлением действия фундаментального закона усложнения системной организации управляемых технических систем. Проблема прогнозирования и поддержки принятия решений в области создания и эксплуатации этих систем, сформулированная как одна из основных задач интеллектуального анализа данных, должна быть решена с учетом совершенствования методов многокритериальной оптимизации и моделирования и формирования новых перспективных направлений развития теории и практики применения этих трех направлений.

Для разработки методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления в современных условиях необходимо сформулировать цель диссертационных исследований, решить основные задачи для достижения цели и проверить положения разрабатываемой методологии. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и эксплуатации технических систем в целом.

Проблемы оптимизации и моделирования систем, 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. Черноруцкий, Ф.А. Черноусько и др. Методы теории управления техническими системами 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. Растринин 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, Б.В. Соколов, 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 в рамках жизненного цикла, в том числе определение связей между проектными и эксплуатационными решениями и повышением технического уровня, эффективности и качества функционирования управляемых технических объектов.

Для решения фундаментальной научной и научно-практической проблем разработана методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, созданы и внедрены комплексные методы исследования технических систем, поддержки принятия решений в их проектировании и эксплуатации, причем как в выбранной области исследований

объектов ракетно-космической и авиационной техники, так и за ее пределами, на этапах жизненного цикла создания и эксплуатации.

В диссертационной работе принято следующее определение: методология - это совокупность принципов, методов, приёмов, форм и средств организации теоретических и практических направлений деятельности в различных областях.

**Объектом диссертационного исследования** являются сложные технические объекты и их системы управления.

**Предмет исследования:** принципы, методы, методическое и алгоритмическое обеспечение многокритериальной оптимизации и моделирования технических объектов и их систем управления, методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия проектных и эксплуатационных решений, прогнозирования, оценки эффективности и качества сложных технических 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 эффективности и качества управляемых технических объектов на этапах их жизненного цикла с помощью разработанной методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, а также создание комплексных методов и методик исследования, прогнозирования, поддержки принятия решений как в выбранной области практического применения, так и за ее пределами на этапах жизненного цикла создания и эксплуатации технических систем.

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

1. Проведение анализа существующих методов, методических и алгоритмических средств многокритериальной оптимизации, моделирования технических объектов и их систем управления и новых технологий интеллектуального анализа данных, для выявления проблем и определения направления исследований.

2. Формулировка фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе, применительно к поставленной цели исследований.

3. Разработка новой методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления, ее принципов, положений и основных составляющих на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, для решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем, включая поддержку принятия решений в проектировании и эксплуатации технических объектов как новую формулировку проблем многокритериальной оптимизации и моделирования с учетом возможностей интеллектуального анализа данных и связи с жизненным циклом и создание механизмов формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями.

4. Формулировка и решение проблемы формирования и размерности пространства входных и выходных параметров технического объекта и его системы управления, определение места методов многокритериальной оптимизации в решении фундаментальной научной и научно-прикладной проблем. Постановка и решение задач разработки ансамблей критериев качества технических систем, оценки их состояния,

прогнозирования, исследования, включая метакритерии качества перечисленных критериев.

5. Разработка обобщенной структурной схемы исследования технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем.

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

7. Разработка аналитических методов построения фронта Парето. 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.

8. Разработка новых стратегий организации моделирования в том числе, имитационного для решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе в рамках жизненного цикла, в том числе определение связей между проектными и эксплуатационными решениями и повышением технического уровня, эффективности и качества функционирования управляемых технических объектов

9. Постановка и решение задачи новой трактовки метода аналогий, разработка методологических аспектов новой формулировки для решения задач моделирования технических объектов и их систем управления и создание на ее основе конкретных методов планирования и проведения моделирования этих систем.

10. Постановка и решение задачи формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования состояния технических объектов предметной области – ракетно-космической и авиационной техники, на этапе создания и эксплуатации систем.

11. Разработка новых методов исследования, установления причинно-следственных связей, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области – ракетно-космической и авиационной техники, включая аналитические методы, на этапе их создания и эксплуатации.

12. Разработка методов решения задач исследования и диагностики технических объектов и их систем управления на основе интеллектуального анализа данных в процессе создания и эксплуатации систем.

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

#### **Научная новизна заключается в следующем:**

1. Разработана новая методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления и ее основные принципы, положения и составляющие на основе объединенной 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 их исследования, проектирования, оценки состояния и прогнозирования. Методология отличается от известных методов исследований наличием разработанных механизмов формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями, и общего теоретического подхода к созданию методов в указанных направлениях, как задач

управления, а также разработанных конкретных методов и методик исследования. Разработанные основные принципы и положения новой методологии включают формулировку и установление причинно-следственных связей в сложной иерархической системе применительно к поставленной цели исследований, поддержку принятия в проектировании и эксплуатации технических объектов 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, в котором усилена обоснованность принятия решений на всех стадиях жизненного цикла технического объекта.

2. Сформулирована и решена проблема определения структуры и размерности пространства входных и выходных параметров технического объекта и его системы управления, что позволило создавать наборы моделей, определять оптимальный состав указанных параметров, необходимый и достаточный для выявления причинно-следственных связей, соответствующих задаче. Определено место многокритериальной оптимизации в решении фундаментальной научной и научно-прикладной проблем.

3. На основе стратегии объединения трех основных направлений поставлена и решена задача разработки новых ансамблей критериев качества, включая метакритерии, позволившая создать и оптимизировать конкретные ансамбли, соответствующие этапам исследования, проектирования и эксплуатации управляемых технических систем и отличающиеся своим составом от ранее разработанных.

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

5. Поставлена и решена новая задача разработки нового общего теоретического подхода к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, как задач управления, состоящего в переходе от пространства состояний системы к пространству критериев, параметров новых моделей технического объекта с определением соответствующих управлений. На основе подхода разработаны методы многокритериальной оптимизации, редукции, линеаризации.

6. Разработаны аналитические методы решения задачи многокритериальной оптимизации на основе выдвинутых и доказанных утверждений. Поставлена и решена новая задача активного управления фронтом Парето, новизна состоит как в формулировке проблемы управления фронтом, так в разработанных конкретных методах решений.

7. Разработана новая формулировка подхода к фронту Парето как объекту многокритериальной оптимизации и оптимального управления и определение критериев его качества, разработаны методы поддержания его робастности. Установлен факт порождения новых «вложенных» фронтов.

8. Разработаны новые стратегии организации моделирования в том числе, имитационного, технических объектов и их систем управления, для решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем, позволившие на основе объединения трех направлений исследований повысить качество проводимых исследований, обоснованно выбирать перспективные области, обеспечивающие качество разрабатываемой технической системы, сократить вычислительные затраты

при решении задач моделирования на этапе проектирования и оценки состояния в процессе эксплуатации за счет:

- формирования ансамбля критериев качества моделирования для задач построения моделей и численных моделирования технических объектов, в том числе объектов ракетно-космической и авиационной техники;
- формирования областей исследований пространства входных и выходных параметров, включая детерминированные, нерегулярные и стохастические переменные, описывающие внутреннее состояние технических объектов и внешние воздействия;
- разработки методов повышения эффективности вычислительных экспериментов при многовариантном анализе с учетом изменения параметров технических объектов, внешних и внутренних возмущений в задачах их проектирования, определения индикаторов состояния и прогнозирования для последующего применения в процессе эксплуатации в соответствии с критериями качества моделирования для численных расчетов, для чего использовались полученные решения формирования переменных оптимальных сеток, адаптированных к динамически изменяющемуся параметром системы;
- создания методов решения задачи формирования областей адекватности моделей движения технических объектов в динамической постановке, удовлетворяющих разработанным критериям качества моделей.

9. Разработана новая трактовка метода аналогий, а именно, перенос особенностей процессов функционирования одних систем на процесс организации исследований других систем, в том числе перенос идей управления объектами на управление моделями и критериями. Разработаны методологические аспекты для решения задач моделирования и созданы конкретные методы.

10. 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.

11. Разработаны новые методы исследования, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области, реализующие решение фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в технических системах, включая аналитические методы и методы на основе интеллектуального анализа данных. Новизна заключается в формировании новых ранее не существовавших аналитических моделей объектов ракетно-космической и авиационной техники, претерпевших повреждения. Новые модели являются основой для установления характера влияния повреждений на функционирование объектов, определения степеней их допустимости, по достижению которых состояние повреждения переходит в состояние критичного или катастрофического отказа. Новизна также состоит в разработке новых индикаторов, например, формирования Граммиана управляемости, ранжирования системы индикаторов для разных технических объектов.

**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 и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями и решения фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной иерархической системе в рамках жизненного цикла, в том числе определения связей между проектными и эксплуатационными решениями и повышением технического уровня, эффективности и качества функционирования управляемых технических объектов, и определяется возможностью

использования разработанных методов, моделей и программ для комплексной поддержки принятия решений при разработке технических объектов и их систем управления и повышения 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 объектов ракетно-космической и авиационной техники. Так удалось добиться для рассматриваемых объектов сокращения объема хранимой информации в 4 раза. Количество обращений к обновленной информации сократилось в 2-4 раза.

3. Повышение качества функционирования технических объектов за счет усиления обоснованности принимаемых решений в процессе создания и эксплуатации на этапах жизненного цикла, в том числе получения более точных моделей (ошибки расчетов по оптимальным переменным сеткам снизились на 10-20%, применение более совершенных методов линеаризации позволило сократить ошибки модели до 10%)

4. Сокращение энергетических затрат на функционирование систем управления техническими объектами за счет улучшения качества моделей, используемых для создания систем управления техническими объектами. Так интегральные затраты на управление сократились от 2 до 5 раз.

5. Применение разработанных алгоритмов и комплексов компьютерных программ формирования моделей, критериев качества моделей и управления процессами моделирования позволило проводить многовариантные анализы особенностей функционирования объектов ракетно-космической и авиационной техники в условиях действия внешних и внутренних возмущений детерминированного и стохастического характера, в том числе: БПЛА самолетного типа, БПЛА роторного типа; деформированный ЛА с базовой осесимметричностью, ЛА с базовой осесимметричностью и блоком управления, модели в НКО МКС, многокритериальная оптимизация в композитных материалах ракетно-космической отрасли и др.

**Основные положения,** выносимые на защиту:

1. Новая методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, и ее основные принципы, положения и составляющие, 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. Разработанный механизм формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями: многокритериальной оптимизацией, моделированием и интеллектуальным анализом данных.

2. Постановка и решение на основе стратегии объединения трех основных направлений задачи разработки новых ансамблей критериев качества, включая метакритерии, позволившее создать и оптимизировать конкретные ансамбли, соответствующие этапам исследования, проектирования и эксплуатации управляемых технических систем.

3. Постановка и решение задачи разработки нового общего теоретического подхода к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, как задач управления, состоящего в переходе от пространства состояний системы к пространству критериев, параметров новых моделей технического объекта с определением соответствующих управлений, и разработка соответствующих методов исследований, в том числе, методов многокритериальной оптимизации, редукции, линеаризации.

4. Аналитические методы решения задачи многокритериальной оптимизации на основе выдвинутых и доказанных утверждений. Постановка и решение новой задачи активного управления фронтом Парето, позволившая определить конкретные направления изменения параметров системы и более обоснованно формировать требования к критериям в задаче многокритериальной оптимизации. Формулировка нового подхода к фронту Парето как объекту многокритериальной оптимизации и управления и определение критериев его качества.

5. Новые стратегии организации моделирования в том числе, имитационного, технических объектов и их систем управления, для решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем.

6. Новая трактовка метода аналогий, а именно, перенос особенностей процессов функционирования одних систем на процесс организации исследований других систем, в том числе перенос идей управления объектами на управление моделями и критериями. Разработанные методологические аспекты для решения задач моделирования и созданные конкретные методы.

7. Решение задачи формирования и многокритериальной оптимизации индикаторов состояния, качества функционирования и прогнозирования состояния технических объектов предметной области на этапе создания и эксплуатации систем. Разработанные новые методы исследования, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области, реализующие решение фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в системах, включая аналитические методы для формирования новых ранее не существовавших аналитических моделей объектов ракетно-космической и авиационной техники, претерпевших повреждения и методы на основе интеллектуального анализа данных. Новые модели как основа для установления характера влияния повреждений на функционирование объектов, определения степеней их допустимости, по достижению которых состояние повреждения переходит в состояние критичного или катастрофического отказа.

**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 имеются 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 МГТУ им. Н.Э. Баумана, «Управление техническими системами» специалистов для 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 и при его непосредственном участии. 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** 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 379 страницах, содержит 163 рисунков, 9 таблиц, Приложение.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются научная проблема и фундаментальная научная проблема, излагаются цель и основные задачи исследования, формулируются научная новизна, практическая ценность полученных результатов и основные результаты, выносимые на защиту, внедрение результатов работы, апробация результатов, публикации, личный вклад, соответствие специальности, объем и структура 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. Отмечены проблемы и потенциальные направления исследований.

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 направлениями в настоящее время исследованы весьма слабо. Решение задачи формирования объединенной методологии должно быть выполнено на уровне разработки общей концепции и ее отдельных компонент.
- Новое объединение трех направлений 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 и цели исследований.

Ожидаемыми результатами являются повышение обоснованности принимаемых проектных и эксплуатационных решений за счет введения новых ансамблей критериев и метакритериев, увеличение точности расчетов за счет совершенствования моделей, повышение эффективности вычислительных экспериментов, уменьшение затрат на управление, сокращение времени вычислений по определению набора компромиссных решений в рамках задачи многокритериальной оптимизации, использование в процессе эксплуатации наиболее информативных индикаторов состояния, выработка обоснованных решений о продолжении или прекращении функционирования объектов.

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

объединения трех направлений исследований для формирования новых методов как в пределах этих направлений, так и на стыке соответствующих дисциплин за счет взаимного обогащения и получения новых свойств.

Представлена формулировка фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной системе применительно к цели диссертационных исследований и определены основные задачи многокритериальной оптимизации систем, оценки состояния системы, прогноза состояния, формирования пространства выходных параметров – критериев качества и функциональных ограничений в рамках многокритериальной оптимизации, которые позволяют сформировать непустое множество решений.

Общим методом решения перечисленных задач является разработка механизмов формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями между многокритериальной оптимизацией, моделированием и интеллектуальным анализом данных, приведенного в диссертации.

Показано соответствие общих признаков общей методологии научных исследований и их реализации применительно к методологии диссертационного исследования.

В данном исследовании рассматривается понятие методологии как совокупности методов, применяемых в определенной сфере деятельности, а именно, в создании и эксплуатации технических объектов и их систем управления. С этих позиций определены следующие базовые принципы и положения методологии:

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

Выбраны следующие этапы жизненного цикла: формирование облика системы; разработка технического задания; разработка технического предложения; разработка эскизного проекта; разработка технического проекта; разработка рабочего проекта; заводские (стендовые) испытания опытной технической системы; летные испытания; корректировка рабочего проекта; приемо-сдаточные испытания; эксплуатация системы потребителем; утилизация системы.

Методология включает следующие основные компоненты:

1. Базовые положения и принципы методологии.
2. Обобщенная структурная схема процесса исследования технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем.
3. Формулировка и решение проблемы размерности и задачи многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной научной и научно-прикладной 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 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;

- подходы к задаче формирования областей адекватности с критериями качества моделирования для задач построения моделей технических систем.

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

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

9. Методы исследования, диагностики и прогнозирования технических объектов и их систем управления предметной области, включая аналитические методы, в том числе для установления причинно-следственных связей в технических 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. Показаны результаты разработки механизмов формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями с учетом разработанных автором новых методов в трех составляющих методологии (Рисунок 2).

Сформулированы проблема размерности и место многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем. Классификация включает следующие виды размерности: структуры; пространства исследуемых параметров; изменяемого пространства исследуемых входных параметров при проектировании (многокритериальная оптимизация) и эксплуатации; изменяемого пространства исследуемых выходных параметров при проектировании (многокритериальная оптимизация) и эксплуатации. Отмечена связь задачи сокращения размерности с подходами интеллектуального анализа данных и методами исследования сложных систем. Приведена классификация задач многокритериальной оптимизации и ссылки на главы, в которых представлено решение соответствующих задач.

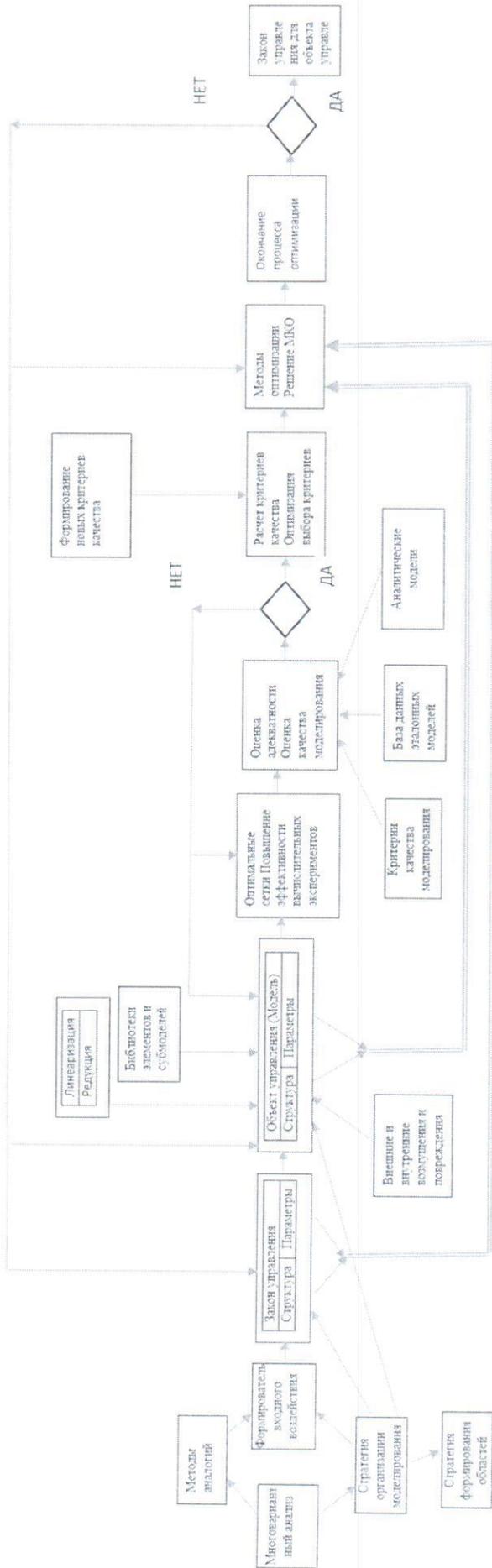


Рисунок 1. Процесс исследований и структура диссертации и

Глава	Положение диссертации	Связь	Глава	Положение диссертации	Связь
1	Сравнительный анализ интеллектуального анализа данных Data Mining и моделирования экспертных систем	М.И.И.М.	4	Поставлена задача формирования общих критериев качества моделирования с учетом общей задачи создания и эксплуатации технических систем	И.О.М.О.И.И.
2	Проверка применимости новых формальных проблем моделирования и оптимизации с учетом возможности интеллектуального анализа данных и продолжение на следующий уровень в исследовании технических систем	М.И.И.М. О.М.И.О. О.И.		Формирование новых стратегий организации процесса моделирования	И.О.М.О.И.И.
	Общая структура моделирования и многокритериальной оптимизации с учетом возможности интеллектуального анализа данных	М.И.И.М. О.М.М.О. О.И.И.О.		Решение задачи оптимизации пространства параметров с учетом полноты и других характеристик распределения критериев в пространстве	М.И.М.О.
	Проблема реверсности и место многокритериальной оптимизации в рамках решения функциональной и структурной задачи. Формирование ансамбля критериев качества, соответствующих разным задачам и классификация критериев	О.И.И.О.		Изучение поведения объектов на границе допустимой области - метод штрафных функций	М.О.М.
	Механизм формирования новых критериев связей между составными стратегиями	М.И.И.М. О.М.М.О. О.И.И.О.		Повышение эффективности вычислительных экспериментов при моделировании управляемого динамического процесса	М.О.
3	Разработка общих алгоритмов метода моделирования, оптимизации и прогнозирования на языке управления	М.О.И.О.О.		Проблема адекватности, адекватности и избыточности. Области адекватности, их изменения и связи	М.И.М.О.
	Применение аналитических методов в исследовании Парето-оптимальных систем управления	О.О.	3	Разработка классификации индикаторов состояния	М.О.М.
	Фронт Парето как объект оптимизации и управления	М.О.О.		Введение в рассмотрение новых индикаторов	М.О.М.
	Задача управления фронтотом Парето как задача оптимального управления	О.О.		Задача многокритериальной оптимизации индикаторов состояния и критериев качества	О.И.И.О.
	Управление Фронтотом Парето как задача обеспечения устойчивости	О.О.		Связь индикаторов состояния и критериев качества функционирования системы	О.И.И.О.

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

Решение задачи формирования критериев качества основывалось на возможностях методологии и объединенной стратегии, что позволило разработать классификацию новых критериев: основные и метакритерии (критерии критериев).

Для оптимизации качества критериев моделирования используются методы многокритериальной оптимизации, индикаторы состояния, сформированные по результатам интеллектуального анализа данных. Результаты применяются для определения областей адекватности. Конкретный набор частных критериев составляет структуру критериев. Применение термина «структура» обусловлено отличием от более узкого понятия элементов вектора 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. Пусть 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  $B_{ji}(t)$ . Ставится задача многокритериальной оптимизации структуры и параметров критериев:  $S \Rightarrow opt; B_{ji} \Rightarrow opt$ . Ограничения в решаемых задачах, например, это определение набора критериев, которые являются наиболее значимыми для решаемой задачи, а также обоснованный выбор допустимых границ критериев.

В диссертации предложен новый подход, позволяющий дать ответ на нерешенный вопрос о качестве самих частных критериев через введение новой трактовки понятия метакритериев, используемых для оценки качества критериев (критериев критериев). Были созданы следующие новые ансамбли критериев, в том числе: 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.

**В Главе 3** представлены обоснование необходимости постановки и решение задачи разработки общих теоретических методов многокритериальной оптимизации и моделирования, 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. Для этого выполняется переход от пространства состояний системы к пространству критериев, параметров новых моделей объекта с определением соответствующих управлений.

Рассмотрен аналитический подход к задаче многокритериальной оптимизации, являющийся альтернативой к вычислительно затратным численным методам зондирования пространства параметров. Для этого сформулированы четыре утверждения, позволяющие по характеристикам контрамонотонности и комонотонности и– угла между соответствующими векторами антиградиентов на плоскости, взятого по наименьшему расстоянию. 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).

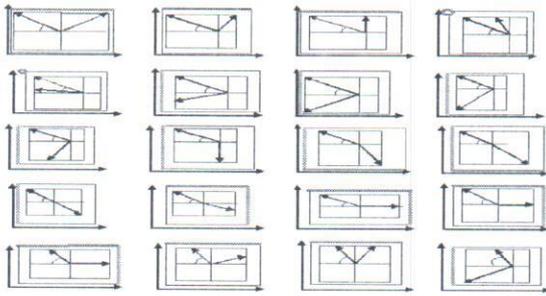


Рисунок 3. Взаимное расположение линий Парето и антиградиентов

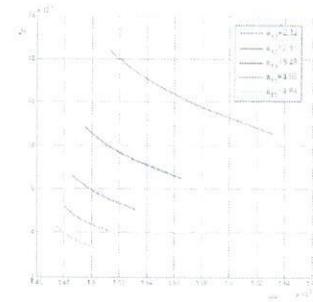


Рисунок 4. Влияние изменения динамического коэффициента  $a_{13}$

Представлена постановка и решение задачи управления фронтом, которая формулируется как активное управление, а именно, изменение формы и параметров фронта (рангов) Парето может быть достигнуто за счет целенаправленного изменения параметров объекта управления, введенных корректирующих устройств с заданными диапазонами вариаций параметров. Это – первая задача управления фронтом. Представлена методика активного управления фронтом по критериям переходного процесса. Определена структура рангов Парето, их зависимость от свойств регулятора и условия перехода (Рисунок 5). Отмечены конкретные физические параметры, изменения которых в рамках создания систем управления техническими объектами позволяют добиться наилучших эффектов по улучшению компромиссных решений. Получены аппроксимирующие зависимости для показателей качества

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

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

где  $a_{bx}, \dots$  - коэффициенты аппроксимирующих полиномов для критерия  $J_x$ ,  $a_{bu}, \dots$  - коэффициенты аппроксимирующих полиномов для критерия  $J_u$ . В отличие от общепринятого подхода к аппроксимации области 'достижимости' здесь получены аналитические зависимости для критериев. Они были использованы для оценки пределов возможного улучшения показателей качества в рамках разработанной методики активного управления фронтом по интегральным критериям.

Предложен новый подход к описанию фронта Парето как объекту 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 6).

Фронт Парето может быть охарактеризован через некоторые индикаторы

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

Сформированы следующие индикаторы фронта (рисунки 6, 7):

- 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  $\rho_f$ ;
- наклон фронта Парето  $\varphi_f$  в данной точке как мера соотношения пары критериев.

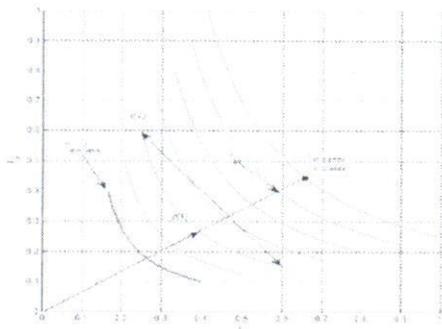


Рисунок 5. Фронт Парето для разных значений постоянной времени  $T$  и коэффициента демпфирования  $\zeta$ .

Показано, что фронт Парето имеет все признаки объекта управления, в частности, наличие объекта или процесса управления, средства управления, настраиваемые параметры или структуры средств управления (рисунок 8).

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 лицо, принимающее решение (ЛПР).



Рисунок 8 - Фронт Парето как объект управления:  $I_s, I$  – желаемые и текущие значения индикаторов фронта

В диссертации приведен вывод индикаторов фронта Парето для двух взаимно противоречивых критериев времени нарастания и времени переходного процесса управляемого объекта

$$l(T) = Tf_l;$$

$$f_l = \sqrt{(\zeta_{max} - \zeta_{min})^2 \left( 3.6^2 \left( \frac{1}{M_{tr}} \right)^2 + \frac{16}{(\zeta_{max}\zeta_{min})^2} \left( \frac{1}{M_{ts}} \right)^2 \right)} = (\zeta_{max} - \zeta_{min}) \sqrt{\left( 3.6^2 \left( \frac{1}{M_{tr}} \right)^2 + \frac{16}{(\zeta_{max}\zeta_{min})^2} \left( \frac{1}{M_{ts}} \right)^2 \right)}$$

$$\rho(T) = Tf_\rho;$$

$$f_\rho = \sqrt{\left[ (3.6\zeta_{eq} + 0.80)^2 \left( \frac{1}{M_{tr}} \right)^2 + \left( \frac{4}{\zeta_{eq}} \right)^2 \left( \frac{1}{M_{ts}} \right)^2 \right]}$$

где  $\zeta_{min}, \zeta_{max}$  - минимальное и максимальное значения коэффициентов демпфирования,  $M_{ts}$  и  $M_{tr}$  - максимально допустимые значения критериев,  $\zeta_{max}, \zeta_{min}$  - диапазоны изменения коэффициентов демпфирования при вариациях параметров регулирования,  $T$  - постоянная времени..

Осуществлен переход к динамическому фронту Парето. Постановка задачи управления фронтом Парето: минимизировать индикаторы за счет настройки параметров системы, используя методы теории оптимального управления. В качестве исследуемых параметров выбраны постоянная времени  $T$  и коэффициент демпфирования  $\zeta$ . Ставится задача настроить диапазон изменения  $\Delta\zeta$  коэффициента демпфирования  $\zeta$ , чтобы компенсировать установленное негативное влияние изменения параметра  $T$ . Используем полученную аппроксимирующую зависимость связи функции  $f_l$  размаха и отклонений коэффициента демпфирования  $\Delta\zeta$  от равновесной точки или полной вариации коэффициента демпфирования:

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

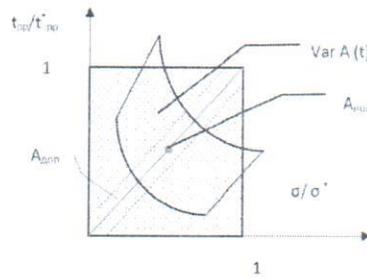


Рисунок 6. Области изменения критериев при вариациях параметров

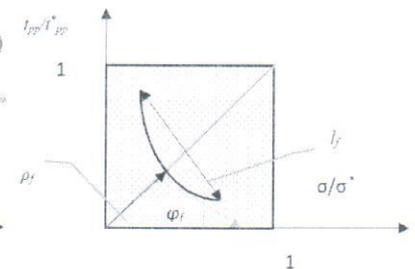


Рисунок 7. Индикаторы фронта Парето

Осуществляется управление размахом  $\tilde{\Delta}\zeta$ , т.е.  $u = \tilde{\Delta}\zeta$ .

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

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x = [\rho(T), l(T)], \quad u = K_\rho \rho + K_l l, \quad \frac{1}{3} \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = q, \quad A = \begin{bmatrix} 3q & 0 \\ 0 & 2q \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 3Tq \end{bmatrix}$$

$$\Phi = -K(t)A(t) - A^T(t)K(t) + K(t)B(t)B^T(t)K(t)$$

$$u_o(t) = -\frac{2}{3} \frac{1}{T} \pm \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{1}{T}\right)^2 + \Phi} l(t), \quad \frac{dl}{dt} = \left( \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \frac{1}{T} \pm \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{1}{T}\right)^2 + \Phi} \right) l, \quad T = T_0 + T_1 t$$

Здесь  $A$  и  $B$  – матрицы свойств объекта и управления,  $x$ - вектор состояния параметров системы:  $l, \rho, u = \tilde{\Delta}\zeta, \zeta_{cp}$  - диапазон вариаций и среднее значение коэффициента демпфирования,  $u, K_\rho, K_l$  – закон управления фронтом, и коэффициенты в законе управления,  $u_o$  – оптимальный закон управления,  $t$  – время,  $K$  – матрица решений уравнения Риккати,  $\Phi$  – весовая функция.

Управляя весовой функцией  $\Phi$ , можно добиться компенсации негативного влияния роста  $T$  за счет настройки диапазона  $\tilde{\Delta}\zeta$  (рисунок 9).

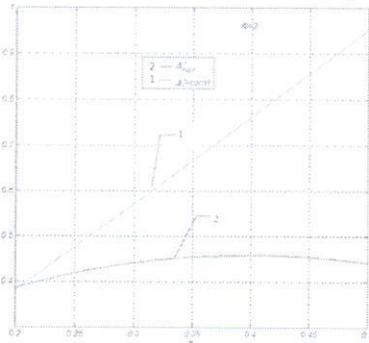


Рисунок 9. Результаты компенсации роста  $T$

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  $T$  и демпфирования  $\zeta$ . Независимым параметром по-прежнему является  $T = T_0 + T_1 t$ . Используя аппроксимацию:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dT f_l}{dt}; \quad f_l = 28.74\Delta^3\zeta - 5.88\Delta^2\zeta + 5.51\Delta\zeta - 0.01,$$

рассчитаем производную ширины фронта и приравняем ее нулю, тем самым обеспечив постоянство ширины:

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

Потребное изменение диапазона демпфирования как производной по времени запишется:

$$\frac{d\Delta\zeta}{dt} = -\frac{T_1(7.05\Delta^2\zeta + 4\Delta\zeta + 0.03)}{(T_0 + T_1 t)(14.1\Delta\zeta + 4)} \cong \frac{-T_1\Delta\zeta}{(T_0 + T_1 t)}.$$

Задача выбора конкретного набора параметров также может быть решена в терминах оптимального управления. Особый интерес представляет случай динамического фронта Парето. Для задачи настройки параметра демпфирования при изменяющемся параметре  $T$  и нормированных критериях задача записывается так:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{t}_r}{dt} \\ \frac{d\tilde{t}_s}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_1}{T} & 0 \\ 0 & \frac{T_1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{t}_r \\ \tilde{t}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T3,6 \frac{1}{M_{tr}} \\ -\frac{4T}{\zeta^2} \frac{1}{M_{ts}} \end{bmatrix} u, \quad \text{где } T = T_0 + T_1 t; \zeta = \zeta_0 + \zeta_1 t.$$

При заданных  $T_0, T_1, \zeta_0$  надо найти  $\zeta_1 = u$ .

Решение алгебраического уравнения Риккати в связи с особенностями получающихся матриц пространства состояний приводит к плохо обусловленной задаче, поэтому используется решение дифференциального уравнения Риккати с расчетом установившихся значений:

$$dK(t)/dt = -2T_1/T K(t) + K(t)B(t)B^T(t)K(t) - \Phi.$$

Более общим случаем является настройка  $\zeta$  общего вида, т.е.  $\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 t$ .

Тогда управление ищем в виде:  $u = d\zeta_1/dt$ .

Робастность по демпфированию уменьшается с ростом  $T$ . Если ограничить размах фронта, то при росте  $T$ , т.е. отклонений  $\Delta T$  от номинального значения, надо уменьшать  $\Delta\zeta$ . Т.е. наличие взаимная противоречивость  $\Delta T$  и  $\Delta\zeta$ , и можно говорить о вложенном фронте Парето, или фронте Парето следующего уровня.

Задачу робастности фронта Парето также можно сформулировать как проблему удержания рангов Парето в некоторой области при вариациях параметров. В нашем случае это  $T$  и  $\zeta$ , причем в простейшем случае допустимая область имеет вид прямоугольника, который можно описать с помощью ранее введенных расстояния по равновесной линии и ширине фронта. Тогда ограничения накладываются на величины вариаций  $\Delta\rho$  и  $\Delta l$ . Соответствующие аппроксимирующие формулы имеют вид:  $\Delta\rho(T) = \Delta T f_\rho$ ;  $\Delta l = \Delta T (6\Delta\zeta)$ .

С другой стороны, как правило, известны непосредственные ограничения на критерии качества самого процесса время нарастания и время переходного процесса  $t_{rmax}, T_{smax}$ , т.е.

$$t_r = T(3.6\zeta + 0.80) \leq t_{rmax}; T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} = \frac{4T}{\zeta} \leq T_{smax}. T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} = \frac{4T}{\zeta} \leq T_{smax}$$

Из первого соотношения следует предельное значение  $\zeta_{max}$ , причем с ростом  $T$   $\zeta_{max}$  уменьшается. Из второго следует  $\zeta_{min}$ , причем с ростом  $T$   $\zeta_{min}$  увеличивается. Т.е. с ростом  $T$  допустимый диапазон  $\Delta\zeta$  сужается.

С учетом масштабирования имеем:

$$\zeta_{max} = (M_{tr}t_{tmax}/T - 0.80)/3.6; \zeta_{min} = 4T/(M_{ts}T_{smax});$$

$$\zeta_{max} - \zeta_{min} = (M_{tr}t_{tmax}/T - 0.80)/3.6 - 4T/(M_{ts}T_{smax}).$$

Итоговая формула связи отклонений  $T$  и  $\Delta\zeta$ :  $\Delta T = l_{max}/6\Delta\zeta - T_{min}$

Представлено решение задачи формирования редуцированных 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 нелинейной модели объекта управления  $\dot{x} = f(x) + Bu$  как задачи оптимального управления. Модель после линеаризации имеет вид:  $\dot{z} = (A_0 + \Delta A)z$ . Для нахождения дополнительной матрицы  $\Delta A$  в линеаризованной модели применяются методы оптимального управления, которые используются для минимизации ошибки оценки на основе решения уравнения Риккати  $\dot{K}(t) = -K(t)\Delta A(t) - \Delta A^T(t)K(t) + K(t)B_r(t)R^{-1}B_r^T(t)K(t) - Q$ .

Ставится задача синтеза регулятора  $D$  для закона управления  $u_r = -D\Delta z$ ;  $B_r = u_r$ . Решение представляется в виде  $\Delta A = B_r R^{-1} B_r^T(t) K \Delta z / z$

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, для которых выполняются критерии заданной точности модели, алгоритмов многокритериальной оптимизации в задачах построения и оценки областей адекватности.

В Главе 4 представлена разработка новых стратегий организации моделирования, в том числе, имитационного для решения фундаментальной научной 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 успешное решение задачи многокритериальной оптимизации, может происходить через моделирование (прямая задача). Предлагается решить обратную задачу, а именно определить области изменения параметров и структуры модели в процессе многовариантного моделирования через решение задачи многокритериальной оптимизации.

2. Формирование нового ансамбля критериев качества моделирования объекта для решения общей задачи создания и эксплуатации технических систем, в том числе: минимальная сложность в предлагаемых условиях; вычислительная эффективность; надежность и минимизация искажений модели; области адекватности, их оценки, и процессы изменения областей адекватности.

3. Новые методы формирования областей исследований, в рамках формирования пространства входных и выходных параметров, включая детерминированные, нерегулярные и стохастические переменные, в том числе 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, использование нейросетей для формирования областей исследований, изменение областей исследования в реальном времени.

4. Новые подходы к повышению эффективности вычислительных экспериментов, в том числе формирование переменных оптимальных сеток, адаптированных к динамически изменяющимся параметром системы. 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 10).

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.

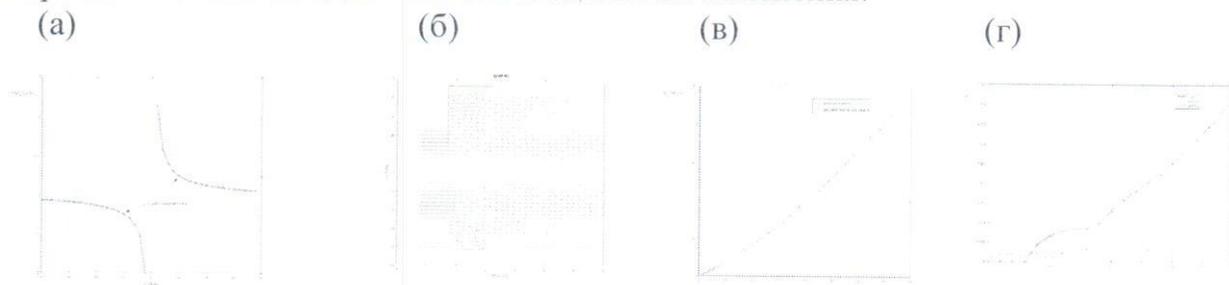


Рисунок 10 - Результаты исследований выбора оптимальных сеток: Зависимость относительного градиента от угла атаки с указанием равновесной точки (а), Поле градиентов моментов тангажа (б), Результаты применения смешанной сетки (в), Ошибки расчетов коэффициента момента тангажа, осредненные по числам Маха (г)  
Показано сохранение свойств устойчивости системы с предложенным переменным шагом и даны объяснения изменений периода колебаний тела.

Предложены ряд 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 адекватности 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 определения областей адекватности, удовлетворяющих соответствующим критериям, проверено на задаче формирования разработанных автором моделей БПЛА, оценке их адекватности, выявления изменения этих областей в процессе движения (Рисунок 11).

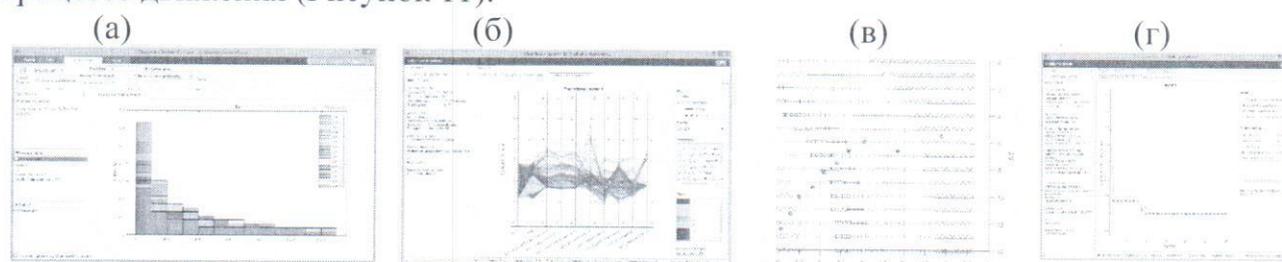


Рисунок 11 - Результаты определения областей адекватности: Результат работы классификатора в виде диаграммы (а), Результат оценки предсказаний динамических областей при использовании параллельных координат (б), Кластеризация Граммиана управляемости (в), результат обучения классификатора(г)

Приводится постановка и решение задачи разработки новой трактовки метода аналогий и создание на ее основе 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 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. Показано использование идей матричного описания геометрии деформированных тел - аналог коэффициента давления и использование криволинейной системы координат (используется гипотеза плоских сечений), а именно: в рассматриваемой плоскости контур тела после искривления не изменится и определится зависимостью:  $r = f(s, \gamma)$ ,  $s$  - текущая координата по длине недеформированного тела или длина дуги искривленного тела,  $\gamma$  - текущий угол, характеризующий положение точки на контуре в рассматриваемом сечении;  $r$  - радиус точки, т.е. расстояние от оси до этой точки в рассматриваемой плоскости (перпендикулярной оси). В МКО также можно исследовать такие сечения, сформировав в пространстве критериев некоторую поверхность. Аналог кривизны и кручения – также может быть использован для

исследования пространства критериев  $\frac{dA^T}{ds} = \left[ \frac{da_{ij}^T}{ds} \right] = \left[ \frac{da_{ij}}{ds} \right]^T$ , где  $A$  – матрица критериев,  $s$  – элементарная площадка в пространстве двух параметров.

Матричное описание перехода к нормальной скорости набегающего потока и компонент нормальной скорости, связанной с угловой скоростью было использовано и для преобразования критериев.

Описано применение энергетического подхода к задаче зондирования пространства параметров. Показан способ перенесения методов оценки устойчивости систем на проблемы устойчивости критериев. Описаны подход к применению методов POD (подходящие ортогональные разложения) для зондирования пространства параметров, способ перенесения технологии планирования действий на технологии планирования моделирования. Приведены описание таких разработанных методов, 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 для полученных в ходе многовариантных анализов значений критериев качества технических объектов 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 задач фундаментальной проблемы установления причинно-следственных связей в сложной системе, а также научно-прикладных проблем 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 технических объектов и их систем управления.

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 12) - пример применения разработанных методов для определения надежности и выбора состава композитных материалов для изготовления элементов БПЛА

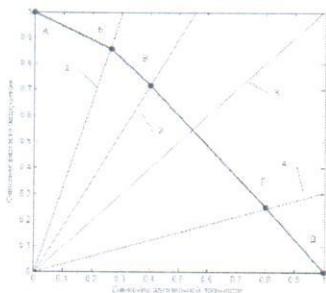


Рисунок 12. Пример применения разработанных методов для определения надежности и выбора состава композитных материалов

Введено понятие пользы как характеристики средств, достаточных для достижения заданной цели или ее синонима - критерия качества самого индикатора. Польза индикатора оценивается по следующим критериям: корреляционная зависимость между отдельными индикаторами; проверка отдельных индикаторов на взаимную противоречивость; значимость индикаторов через оценку рангов; решение задачи сокращения выбора индикаторов; оценка доступности вычисления индикаторов в реальном времени; оценка имеющейся информационной системы - системы датчиков

На Рисунках 13, 14 и 15 показан разработанный процесс исследования повреждений БПЛА

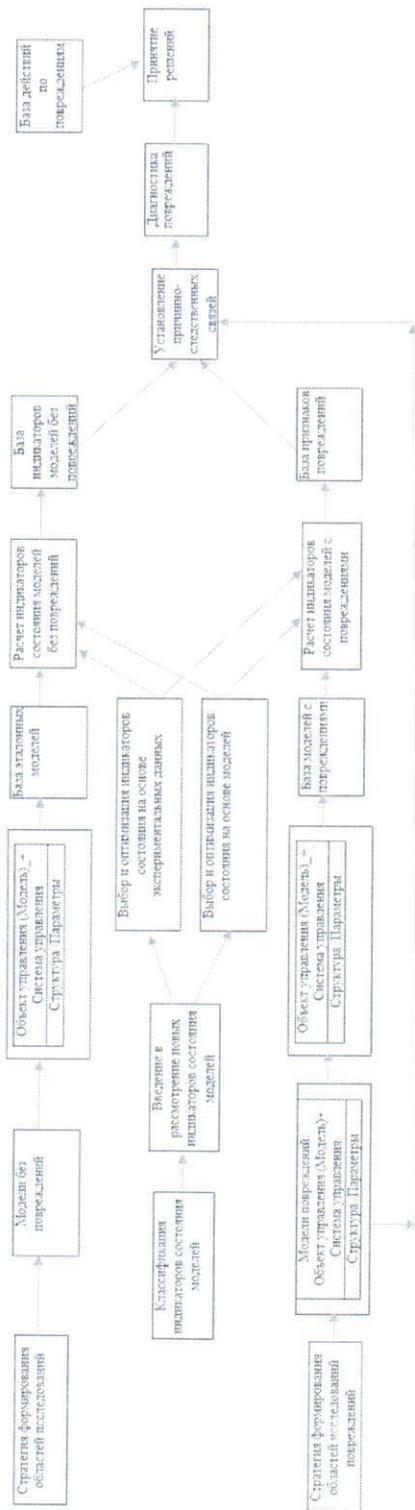


Рисунок 13. Процесс исследований состояний и повреждений технической системы

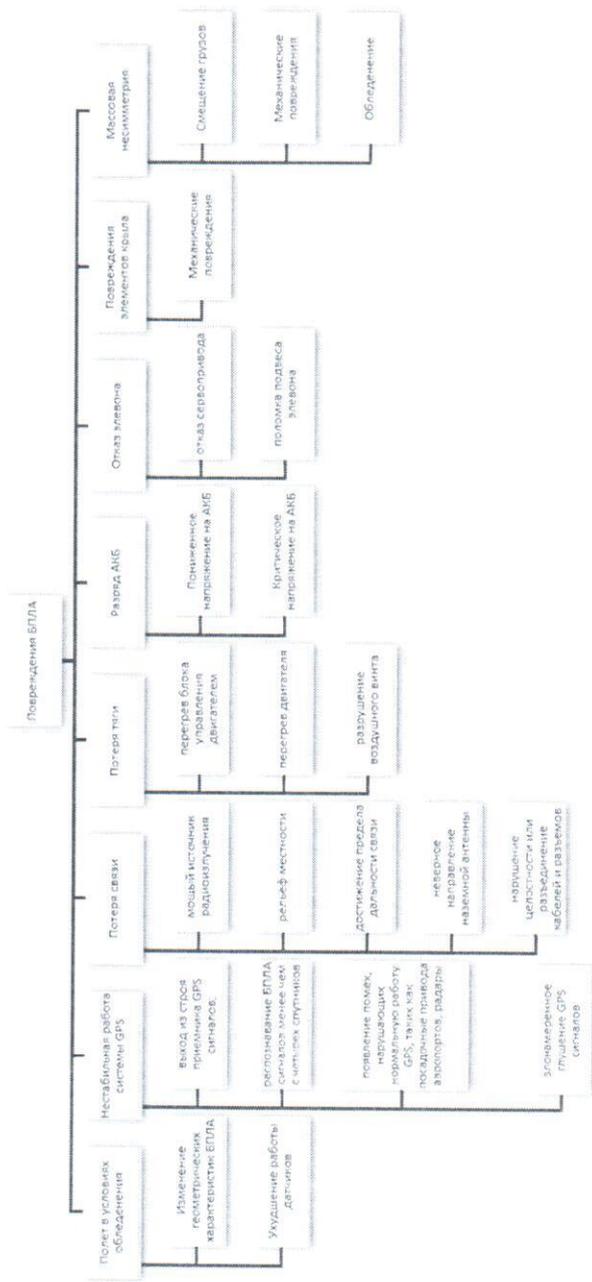


Рисунок 14. Анализ повреждений для БПЛА

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).

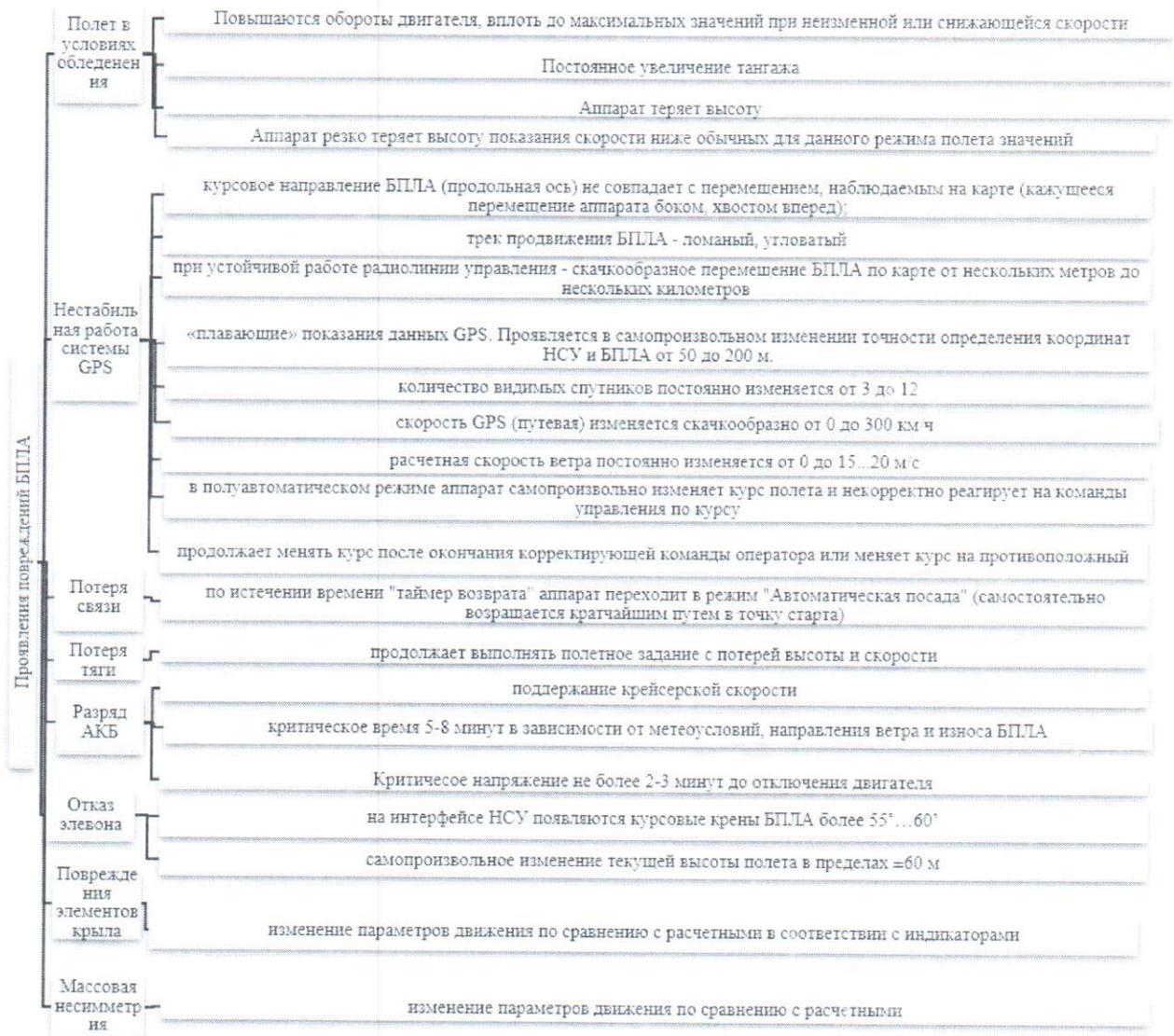


Рисунок 15 - Анализ признаков повреждений БПЛА

Был разработан графический интерфейс для многовариантных анализов и установления причинно-следственных связей между повреждениями (отказами) и их признаками (проявлениями) в техническом объекте типа БПЛА (Рисунок 16).

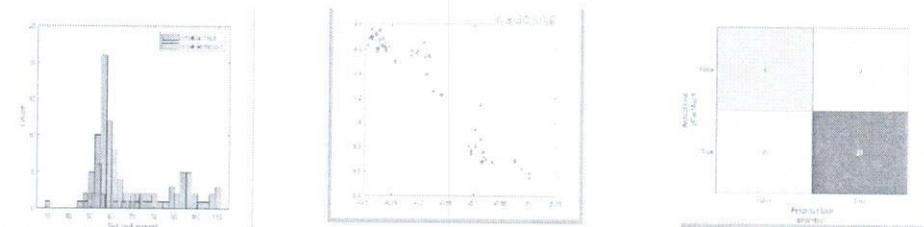


Рисунок 16. Результаты многовариантных анализов влияния повреждений

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.

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 анализа устойчивости движения деформированных удлиненных тел на основе вариаций угловых скоростей крена (Рисунок 17).

$X_1 \dot{X}_1 = -K$   $K = K_0 \bar{\omega}_z^2$ ;  $X_1 = X + A\mu \bar{\omega}_z^2$ ;  $X = \bar{m}_z^2$ ;  $Y_1 = Y + B\mu \bar{\omega}_z^2$ ;  $Y = \bar{m}_y^2$ ; Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  - углы атаки и скольжения,  $\mu$  - плотность тела,  $\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$  - безразмерные угловые скорости,  $i_x, i_y, i_z$  - безразмерные моменты инерции.

$$K_0 = \left[ \left( \frac{\bar{m}_z^2}{2} + \frac{c_{z\alpha}}{2} \right) + B \left( -\frac{1}{2} c_{z\beta} + \frac{c_{z\alpha}}{2} \right) \right] \left[ \left( \frac{\bar{m}_y^2}{2} + \frac{c_{y\alpha}}{2} \right) + A \left( \frac{c_{y\beta}}{2} + \frac{c_{y\alpha}}{2} \right) \right]$$

$$(X + a_1 \bar{\omega}_z^2)(Y + b_1 \bar{\omega}_z^2) + c_1 \bar{\omega}_z^2 = 0,$$

$$X = f(\bar{i}_x, \bar{i}_y, \bar{K}, \bar{x}_{cm}); Y = f(\bar{i}_y, \bar{i}_x, \bar{K}, \bar{x}_{cm});$$

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

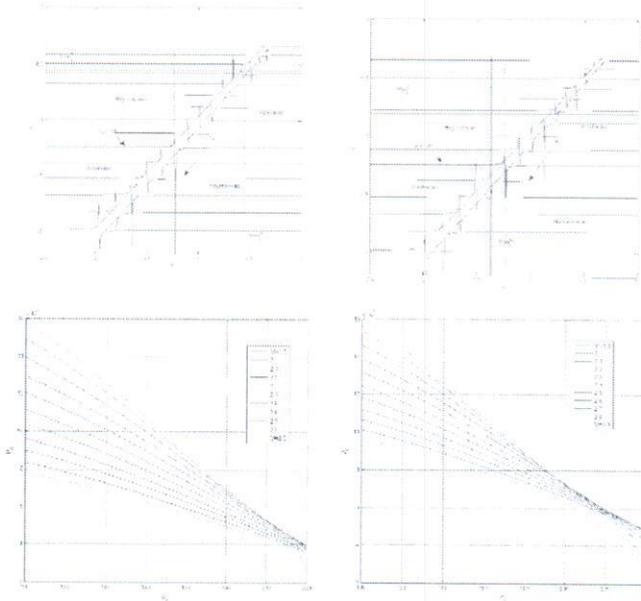


Рисунок 17. Границы устойчивости и совместное влияние числа Маха и угловой скорости на коэффициент  $D_0(\bar{\omega}_x^2)$  для прямого и деформированного тела

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. Численные расчеты, проведенные для прямого и искривленного тел показали, что искривление тела оказывает существенное влияние на смещение линий  $X = \bar{m}_z^2 = -a_1 \bar{\omega}_x^2$ ;  $Y = \bar{m}_y^2 = -b_1 \bar{\omega}_x^2$ ; по сравнению с прямым телом, которое остается внутри границ устойчивости при вариациях угловых скоростей по крену.

$$\omega_{20} = \sqrt{-\sigma_{\beta}(\alpha_0)} \quad \omega_{z_0}^2 = M_z^2 / (J_z \alpha) = \bar{M}_z^2 \quad \Delta \ddot{\alpha} + \omega_{z_0}^2 \Delta \alpha = 0$$

$$\ddot{u} + 2\sigma_{\beta} \dot{u} + \omega_{z_0}^2 [1 + a \cos \omega_{z_0} t] u = 0 \quad a = (K + \kappa_{\varphi} - \kappa_{\varphi} \omega_{z_0}^2 / (2\omega_{z_0}^2)) \Delta \alpha_{max}$$

Искривление тела приводит к сдвигу седловой точки в сторону увеличения угловой скорости и увеличения по абсолютной величине производной  $\bar{m}_y^{\beta}$ . Была разработана аналитическая модели и проведены численные исследования устойчивости деформированных тел, исследование влияния деформаций и асимметрии на параметры движения ЛА (Рисунки 18, 19). Описаны разработанные подходы к выявлению изменения формы летательных аппаратов в процессе движения. Предложены общая классификация методов анализа, отдельные классификации для многоразовых и одноразовых 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

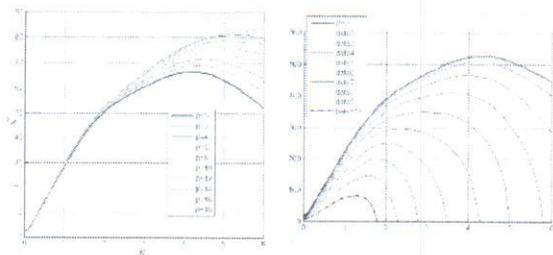


Рисунок 18. Изменение частоты боковых колебаний: кривизна  $K=0,028$

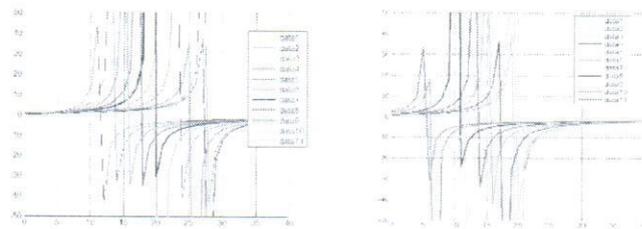


Рисунок 19. Проверка условий резонанса продольных и боковых колебаний

Представлены результаты обработки в рамках описательных статистик для многовариантного анализа при вариации начальных условий для разной степени деформации (Рисунки 20, 21).

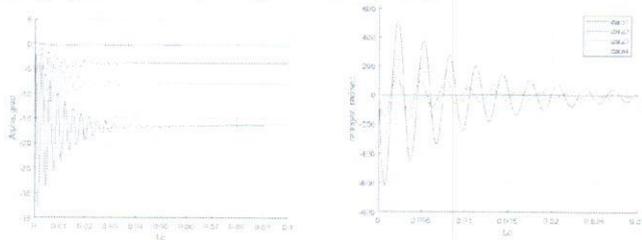


Рисунок 20. Влияние деформаций на параметры движения деформированного тела

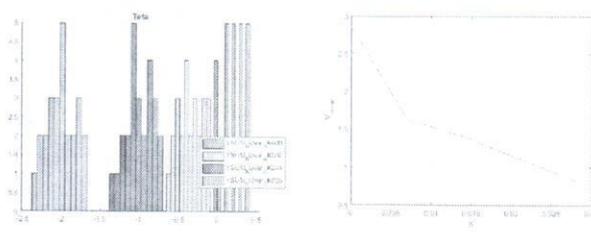


Рисунок 21. Влияние начальных условий на параметры движения деформированных тел и единый индикатор

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 22). Показана способность отобранных индикаторов оценивать наличие повреждений рассматриваемых объектов на основе расчетов индикаторов по результатам измерений угловых скоростей вращения БПЛА, наклона траектории и углов атаки.

Предложено использовать три класса индикаторов, которые получили максимальные ранги: 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.

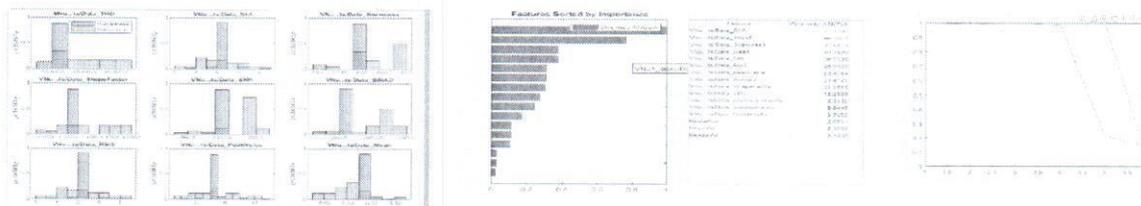


Рисунок. 22 Создание признаков (индикаторов) исследуемых сигналов – фазовых координат системы (а), гистограмма выбранного индикатора, ранг индикаторов (в), свертка индикаторов

На основе выбора индикаторов предлагается выполнять следующие виды анализов повреждений технических объектов и отказов в работе их информационно-управляющих систем, которые могут проводиться во временной, частотной, 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 группового управления БПЛА. В результате проведенных исследований были выполнены все этапы рисунка 13.

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 технических объектов, их систем управления и составных частей. Рассчитывались сокращения затрат на проведение вычислений в часах, повышение точности расчетов по моделям при одинаковом времени моделирования, сокращение энергетических затрат на управление, повышение обоснованности требований к системам при формировании соответствующих технических заданий. Подробное описание технических объектов, которые исследовались с применением разработанной методологии дано в Приложении, в том числе: проект группового управления гетерогенной группой БПЛА и наземных транспортных средств, и его особенности, проект БПЛА самолетного типа, проект БПЛА роторного типа (рисунок 23), проект деформированного ЛА с базовой осесимметричностью (рисунок 24), 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. 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 методов многокритериальной оптимизации, моделирования и методов интеллектуального анализа данных как единой концепции

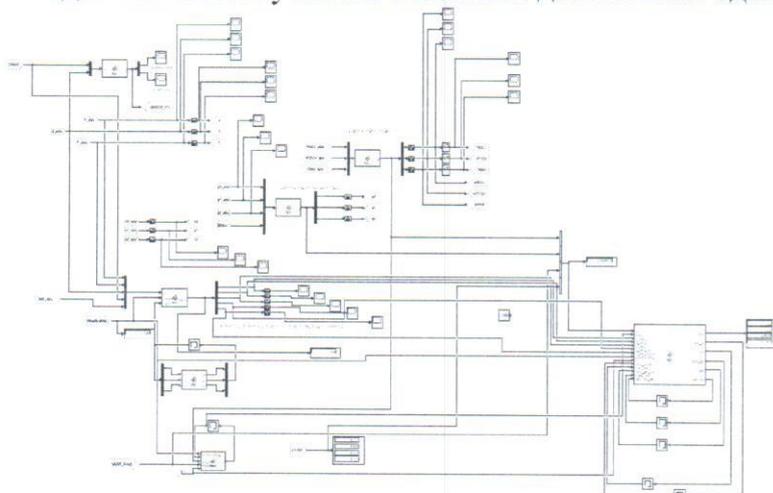


Рисунок 23. Объект БПЛА роторного типа – информационный блок

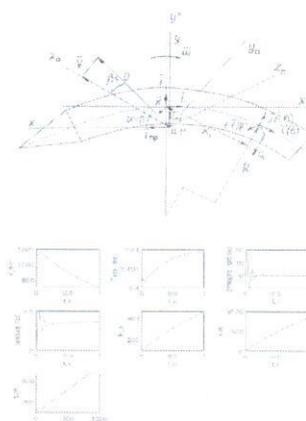


Рисунок 24. Деформированный ЛА: общий вид модели и результаты моделирования

В диссертации приведены результаты расчетов эффективности применения методологии. В заключение дана краткая характеристика основных научных и практических результатов диссертационной работы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Цель диссертационных исследований - повышение эффективности и качества управляемых технических объектов на этапах их жизненного цикла с помощью разработанной методологии создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, а также создание комплексных методов и методик исследования, прогнозирования, поддержки принятия решений как в выбранной области практического применения, так и за ее пределами на этапах жизненного цикла создания и эксплуатации технических систем, достигнута в полном объеме.

2. 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 направления исследований для достижения цели.

3. Разработана новая методология создания и эксплуатации технических объектов и их систем управления на основе объединенной стратегии многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, для решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем, 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. Разработаны основные принципы, положения и составляющие новой методологии

4. Методология отличается от известных методов исследований наличием разработанных механизмов формирования и реализации новых внутренних связей

между тремя направлениями, который позволил взаимно обогатить три направления исследований - многокритериальную оптимизацию, моделирование и интеллектуальный анализ данных, и новым общим теоретическим подходом к созданию методов в указанных направлениях, как задач управления, а также разработанных конкретных методов и методик исследования. Применение методологии позволило повысить обоснованность принимаемых решений за счет введения новых ансамблей критериев и метакритериев, увеличить точность расчетов за счет совершенствования моделей, повысить эффективность вычислительных экспериментов, уменьшить затраты на управление, сократить время вычислений по определению набора компромиссных решений в рамках задачи многокритериальной оптимизации, использовать в процессе эксплуатации наиболее информативные индикаторы состояния, в том числе принимать обоснованные решения о продолжении или прекращении функционирования объектов.

5. Создание механизмов формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями, на основе их интеграции и перекрестного использования, позволило разработать новые методы исследования технических объектов. С учетом связи проводимых исследований с жизненным циклом технической системы это позволило ускорить процессы разработки управляемых технических объектов за счет повышения эффективности моделирования, введения обоснованных критериев качества как самой системы, так и состояния и прогнозирования на этапе ее эксплуатации, оперативной коррекции систем управления

6. Сформулирована и решена проблема определения структуры и размерности пространства входных и выходных параметров технического объекта и его системы управления. Решение позволило создавать наборы моделей, определять оптимальный состав указанных параметров, необходимый и достаточный для выявления причинно-следственных связей, соответствующих конкретной задаче создания и эксплуатации. Определено место многокритериальной оптимизации в рамках решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем, с учетом новых подходов интеллектуального анализа данных, в том числе оптимизация критериев, индикаторов состояния, выбора параметров для исследований, оптимизация стратегии моделирования как выбор упрощения модели - редукция, линеаризация, оптимальные стратегии моделирования как расчета (эффективность вычислительных экспериментов) и оптимизация моделирования как выбор модели по принципу адекватности. Это позволило расширить фундаментальную и научно-практическую методологическую базу для определения направлений новых исследований и совершенствования управляемых технических систем,

7. Разработана обобщенная структурная схема процесса исследования технических систем в соответствии с задачами диссертации и направлениями решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем.

8. Поставлена и решена новая задача разработки общего теоретического подхода к созданию методов многокритериальной оптимизации, моделирования и интеллектуального анализа данных, 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 исследований, позволяющие получить смешанные аналитические и численные решения в отличие от прямых затратных вычислительных методов в каждом из трех направлений в процессе проектирования и эксплуатации технических объектов и их систем управления, включая улучшения сходимости и скорости решения, так разработать механизмы формирования и реализации новых внутренних связей между тремя направлениями. Новизна подхода

состоит в новой ранее не существовавшей формулировке всех перечисленных задач как задач управления, т.е. объединения многокритериальной оптимизации и моделирования, а также интеллектуального анализа данных.

9. Разработаны аналитические методы решения задачи многокритериальной оптимизации на основе выдвинутых и доказанных утверждений. Поставлена и решена новая задача активного управления фронтом Парето, новизна состоит как в формулировке проблемы управления фронтом, так в разработанных конкретных методах решений. Разработана новая формулировка подхода к фронту Парето как объекту многокритериальной оптимизации и оптимального управления и определены критерии его качества, разработаны методы поддержания его робастности. Установлен факт порождения новых «вложенных» фронтов.

10. Разработаны новые стратегии организации моделирования в том числе, имитационного, технических объектов и их систем управления, для решения фундаментальной научной и научно-прикладной проблем, позволившие на основе объединения трех направлений повысить качество проводимых исследований, обоснованно выбирать перспективные области, обеспечивающие качество разрабатываемой технической системы, сократить вычислительные затраты при решении задач моделирования на этапе проектирования и оценки состояния в процессе эксплуатации за счет:

- формирования нового ансамбля критериев качества моделирования для задач построения моделей и численного моделирования технических объектов, в том числе объектов ракетно-космической и авиационной техники;
- формирования областей исследований пространства входных и выходных параметров, включая детерминированные, нерегулярные и стохастические переменные, описывающие внутреннее состояние технических объектов и внешние воздействия;
- методов повышения эффективности вычислительных экспериментов при многовариантном анализе с учетом изменения параметров технических объектов, внешних и внутренних возмущений в задачах их проектирования, определения индикаторов состояния и прогнозирования для последующего применения в процессе эксплуатации в соответствии с критериями качества моделирования для численных расчетов, для чего использовались полученные решения формирования переменных оптимальных сеток, адаптированных к динамически изменяющимся параметрам системы;
- методов решения задачи формирования областей адекватности моделей движения технических объектов в динамической постановке на основе: разработанных критериев качества моделей и оптимальности расчетных сеток, оценки динамических изменений областей адекватности в процессе имитационного моделирования; применения методов редукции нелинейных систем к формированию областей исследований; применения методов оптимального управления в задачах формирования моделей с оптимальными областями адекватности; разработки и применения стохастических методов оценки адекватности; адаптации нейросетевых алгоритмов и других методов интеллектуального анализа данных алгоритмов к формированию и оценке областей адекватности; применения методов многокритериальной оптимизации в задачах построения и оценки областей адекватности и др. – всего десять методов.

8. Решение фундаментальной проблемы новой трактовки метода аналогий позволило разработать методологические аспекты новой формулировки этого метода 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. Для проверки положений использовались методы оценки эффективности для конкретных объектов ракетно-космической и авиационной техники и сравнительный анализ на их моделях.

10. Разработанные новые методы исследования, диагностики и прогнозирования функционирования технических объектов предметной области, реализующие решение фундаментальной проблемы 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, в том числе для повреждений (частичных или некритичных отказов) формировать законы управления техническим объектом по текущему состоянию, для критических катастрофических отказов оперативно вмешиваться в ситуацию и сохранить объект путем своевременного прекращения движения. Новизна заключается в формировании новых ранее не существовавших аналитических моделей объектов ракетно-космической и авиационной техники, претерпевших повреждения, которые являются основой для установления характера влияния этих повреждений на функционирование объектов, определения степени допустимых повреждений, по достижению которых состояние повреждения переходит в состояние критичного или катастрофического отказа. Новизна также состоит в разработке новых индикаторов, например, формирования Граммиана управляемости, ранжирования системы индикаторов для разных технических объектов.

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  $(41/17)4$  раз. Количество обращений к обновленной информации сократилось в  $(2.5)4$  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).
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)
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).
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)
5. 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)
6. 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)
7. 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)

8. 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](https://doi.org/10.1063/1.5133250).(0,63)
9. 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](https://doi.org/10.1063/1.5140178) (0,63)
10. 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)
11. 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)
12. Романова И.К. Основные подходы к выбору состава материала путем многокритериальной оптимизации // Все материалы. Энциклопедический Справочник. 2017. № 7. С. 14-18.(0,3)
13. 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)
14. I.K. Romanova. Modern methods of multidimensional data visualization: analysis, classification, implementation, and applications in technical systems. Science & Education. 2016. № 03. С. 133-167 (2,19).
15. 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)
16. 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)
17. 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)
18. 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)
19. 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)
20. 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)
21. 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)
22. 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)
23. 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](https://doi.org/10.1063/5.0074545) (0,69/0,5)
24. 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)
25. 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](https://doi.org/10.1063/5.0074544). (0,5/0,3)
26. 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](https://doi.org/10.1063/5.0074832) (0,5/0,3)

27. 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)
28. 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)
29. 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)
30. 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)
31. 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, АСМТAA 2015. 2016. С. 012006.(0,6/ 0,2)
32. 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)
33. 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)
34. Мальшева 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)
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)
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)
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)
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)
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)
40. 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)
41. 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)
42. 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)
43. 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)

44. 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)
  45. 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)
  46. 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)
  47. 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)
  48. 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)
  49. 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)
  50. 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)
  51. 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)
  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 № 20212610400 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]. В круглых скобках показаны объемы в п.л., в т.ч./ вклад автора