


На правах рукописи



Бежаева Оксана Яковлевна

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ НА ПРЕДПРОЕКТНОЙ СТАДИИ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Уфа – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
на кафедре технической кибернетики

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Гвоздев Владимир Ефимович

Официальные оппоненты:

Смирнов Сергей Викторович доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», профессор кафедры информатики и робототехнических систем, советник директора ИПУСС РАН - СамНЦ РАН

Сычугов Алексей Алексеевич доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», директор института прикладной математики и компьютерных наук, заведующий кафедрой информационной безопасности

Антамошкин Олеслав Александрович доктор технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой программной инженерии института космических и информационных технологий

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 15.01.2026 в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.479.02 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте www.uust.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



О. Н. Сметанина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Базовым требованием к информационной инфраструктуре в условиях цифровой экономики является предоставление своевременной, полной и достоверной информации, необходимой для урегулирования ситуаций, возникающих в различных частях распределённой информационной системы. Согласно ГОСТ 33707-2016, информационная система (ИС) - система, организующая обработку информации о предметной области и ее хранение.

В современных условиях определяющим направлением построения ИС выступает концепция сетецентрического управления. Система сетецентрического управления представляет собой сочетание заблаговременно созданных и развернутых разветвленных автоматизированных электронных сетей сбора и обработки первичной информации, узлов хранения и анализа информации, а также контуров управления и принятия решений. Их интеграция формирует единое информационное и управленческое пространство. Ключевым свойством таких систем является интероперабельность, обеспечивающая возможность совместного функционирования и обмена данными между разнородными компонентами, подсистемами и участниками в рамках распределённой информационной среды. Особенностью формирования единого информационного пространства является переход от централизованного управления требованиями к функциональным характеристикам ИС к децентрализованным, что предполагает выработку заинтересованными сторонами консолидированных решений на предпроектной стадии.

Ключевая роль единого информационного пространства в задачах сетецентрического управления обуславливают важность задачи обеспечения функциональной надежности локальных ИС, системная интеграция которых формирует единое информационное пространство.

Под функциональной надежностью ИС понимается свойство сохранять работоспособность в соответствии со своим целевым назначением при случайных дестабилизирующих воздействиях и отсутствии злоумышленного влияния на программную и аппаратную составляющую.

В условиях постиндустриального общества, когда единое информационное пространство становится критическим фактором сетецентрического управления, содержание понятия «работоспособность» зависит от ситуации, для урегулирования которой субъектам, вовлеченным в урегулирование, необходима информационная поддержка, соответствующая их информационным потребностям.

Функциональная надежность является латентной характеристикой ИС и объективно характеризуется удовлетворенностью потребителей способностью системы в нужное время предоставлять сведения, соответствующие ситуации, которую нужно урегулировать. Дефекты выступают в качестве критического фактора, определяющего функциональную надёжность. Источниками таких дефектов становятся ошибки, допускаемые субъектами на различных стадиях жизненного цикла ИС, причем дефекты предпроектной стадии в определении требований к свойствам ИС, являются причиной наиболее тяжелых, с точки зрения сетецентрического управления, последствий.

Современная практика показывает, что в области аппаратных компонентов накоплен значительный опыт обеспечения высоких характеристик надежности, при этом уровень надежности программных компонентов недостаточен. Субъектоцентрическая природа проекта разработки ИС предопределяет то, что организационные, методические и технологические ошибки, допускаемые субъектами проектирования, являются неизменной составляющей любого проекта. На это неоднократно указывалось в литературе и аналитических отчётах, в частности в исследованиях *Standish Group*. Недостаточная надежность программных компонентов, в том числе, обусловлена недостаточным уровнем развития теоретической и методической базы управления состоянием ИС, в особенности на предпроектной стадии.

Рост масштабов и сложности ИС существенно ограничивает применимость традиционных подходов к обеспечению функциональной надёжности. В целом, к настоящему времени не сформированы теоретические основы построения систем обеспечения надёжности на предпроектной стадии.

Степень разработанности темы

Понятие «функциональная надежность» и «функциональная безопасность» до настоящего времени трактуется различными исследователями неоднозначно. Согласно положениям стандарта МЭК 61508-2-2012, под функциональной безопасностью (*functional safety*) подразумевается корректное функционирование, как системы управления, так и управляемого оборудования. Липаев В.В. в своих работах считает, что понятия и характеристики функциональной безопасности систем близки к понятиям надежности, определяет надежность и функциональную безопасность продукции, процессов производства и эксплуатации систем как работоспособное состояние и функционирование в соответствии с требованиями заказчика и документацией, при которых отсутствуют опасные отказы и недопустимый ущерб. Характеристики функциональной безопасности учитывают только те реализации опасных отказов, которые привели к крупному или катастрофическому ущербу в то время, как показатели надежности фиксируют все реализации опасных отказов. Шубинский И.Б. в своих работах определяет функциональную надежность как готовность системы к выполнению предусмотренных задач. *J.C. Laprier* определяет надежность (*dependability*) как способность предоставлять услуги, которым можно по праву доверять.

Согласно ГОСТ 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015), надежность (программного средства): набор атрибутов, относящихся к способности программного обеспечения сохранять свой уровень качества функционирования при установленных условиях за установленный период времени.

В исследованиях Платунова А.Е., Быковского С.В., Горбачева Я.Г., Ключева А.О., Пенского А.В. и других авторов подчеркивается, что современные технологии разработки нуждаются в усовершенствовании с целью создания эффективных механизмов защиты систем обработки данных и управления, как от злонамеренных воздействий, так и от непреднамеренных ошибок разработчиков на разных стадиях жизненного цикла.

Вопросы обеспечения функциональной надежности в условиях решения задач управления в реальном времени обсуждаются в работах Мостового А.Я., Постникова Н.П., Кириллова Н.П., Муравьевой-Витковской Л.А., *Edward A. Lee*.

Результаты анализа научных публикаций указывают на принципиальные различия между подходами к управлению умышленно внесенными дефектами и дефектами, возникшими вследствие ошибок разработчиков. Важно отметить, что непреднамеренные дефекты способны вызывать значительно более серьезные негативные последствия по сравнению с результатами от злонамеренных действий.

Широкое распространение получили методы, ориентированные на выявление ошибок по результатам специально организованных испытаний и изучения исторических данных об опыте эксплуатации ИС. Указанные методы, главным образом, соотносятся с реактивным подходом. Основные цели исследований – выявить закономерности в проявлении дефектов и установить причины возникновения. Данные аспекты находят отражение в работах В. Аджиева, *Jeffrey C. Carver, V. Anu, Ritu Soni, Stan Kaplan, S. Visnepolschi*.

В работах *T. Fagerhaug, R. Duphily, B. Andersen* рассмотрены методы, которые можно обозначить понятием *Root Cause Analysis*. Данная группа методов представляет собой адаптацию методологии *I-TRIZ* в область управления функциональной надежностью.

Методы и модели анализа распространения ошибок (англ. *Error Propagation Analysis*) представлены в работах *Anna Perini, А. Морозова, K. Janschek, E. Lee*. Суть данной группы методов заключается в раннем обнаружении дефектов и отказов и парировании этих явлений.

Human Error Taxonomy (HET) – группа методов ориентированных на предотвращение дефектов, обусловленных ошибками субъективной природы. Представляют собой отдельную категорию исследований, представленных в работах *Fugun Huang, Scott A. Shappell, J. Reason*.

На сегодняшний день вопрос управления дефектами, возникающими из-за субъективных ошибок правообладателей и разработчиков на предпроектной стадии, остаётся малоизученным.

В рамках проактивного подхода к управлению сложными системами развиваются методы, ориентированные на сравнительный анализ альтернатив проектных решений по критериям функциональной надежности (англ. *Failure Mode and Effect Analysis* и *Fault Tree Analysis*). Данные методы нашли отражение в работах *Zhu Y.M., Haapanen Pentti, Helminen Atte, I. Verzola* и других исследователей.

В исследованиях Райкова А.Н., Виттиха В.А., Смирнова С.В. отмечается, что одним из ключевых факторов, снижающих эффективность реализации проектов создания сложных систем, является недостаточное понимание ценностей и ориентиров потенциальных пользователей. Это связано, в частности, с трудностями формирования консолидированного мнения различных целевых групп пользователей и размытости целей функционирования сложных систем, к числу которых относятся ИС.

Проведённый анализ научных публикаций свидетельствует о преобладании исследований, ориентированных на реактивный подход к управлению состоянием сложных систем. Использование только реактивного подхода не позволяет обеспечить требуемый уровень функциональной надежности ИС. В целом, на сегодняшний день, повышение функциональной надежности ИС достигается преимущественно за счет развития технологий проектирования, тогда как теоретическим аспектам урегулирования проблемных ситуаций, возникающих в ходе реализации проектов ИС, уделяется недостаточное внимание.

Объект исследования – функциональная надежность ИС.

Предмет исследования – методологическое, методическое, модельное и инструментальное обеспечение функциональной надежности ИС на предпроектной стадии.

Целью диссертационной работы является решение актуальной научно-практической проблемы, заключающейся в создании методологических основ обеспечения функциональной надежности информационных систем на предпроектной стадии в виде комплекса принципов, подходов, методов, системных, структурных и математико-статистических моделей и реализованных на их основе инструментальных средств.

Задачи исследования

1. Формирование методологии обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии на основе принципов и подходов системного анализа.

2. Разработка системных моделей предпроектной стадии на основе положений эвристики.

3. Разработка на основе системных архетипов комплекса структурных, контурных и динамических моделей проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС на предпроектной стадии.

4. Разработка методов обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии.

5. Разработка математико-статистических моделей для определения базовых характеристик проекта ИС на основе исторических данных, а также оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии.

6. Разработка на основе новых научных результатов методик и инструментальных средств обеспечения функциональной надежности ИС.

Методы исследования

При проведении исследований использованы методы системного анализа, положения эвристики, методы контурного и структурного моделирования, математико-статистические методы обработки данных, аппарат теории графов, технологии объектно-ориентированного моделирования и разработки программного обеспечения, отечественные и зарубежные стандарты и руководства, регламентирующие способы решения задач обеспечения функциональной надежности.

Положения, выносимые на защиту

1. Методология обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии на основе принципов и подходов системного анализа.
2. Совокупность системных моделей предпроектной стадии, разработанных на основе положений эвергетики.
3. Комплекс структурных, контурных и динамических моделей проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС, на предпроектной стадии на основе системных архетипов, модель возникновения ошибок на предпроектной стадии, модель структуры интегрального показателя, характеризующего совокупное влияние факторов, как способствующих, так и препятствующих повышению функциональной надежности.
4. Комплекс методов обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии, включая: метод построения многомерных зависимостей; метод оценки состояния функциональной надежности информационных сервисов с учетом субъективных оценок пользователей; метод структурного моделирования последствий отказов функциональных компонент ИС.
5. Математико-статистическая модель для определения базовых характеристик проекта ИС на основе исторических данных, а также оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии.
6. Результаты решения практических задач обеспечения функциональной надежности на основе использования полученных научных результатов, включающие: выявление факторов функциональной надежности ИС при формировании единого информационного пространства компании, методику формальной оценки возможности реализации проекта; методику и прототип программного обеспечения для анализа моделей проектируемых компонентов ИС по критериям функциональной надежности.

Научная новизна результатов

1. Научная новизна предложенной методологии обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии заключается в обоснованном формировании и интеграции общенаучных и специальных принципов и подходов, которые создают методологическую основу для исследования структуры проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС на предпроектной стадии. Методология позволяет изучить структуру и разработать открытую совокупность моделей обеспечения функциональной надежности ИС, объединяющей в себе реактивный и проактивный подходы, на предпроектной стадии. *(п.16 паспорта специальности)*

2. Научная новизна предложенных системных моделей заключается в системном сочетании положений эвергетики, V-модели жизненного цикла и подхода QFD (функции развертывания качества), реализованного в виде модели «Дом качества» - HoQ, применительно к задачам обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии. Комплексное использование системных моделей позволяет повысить прозрачность содержания ожидаемых результатов проекта для заинтересованных сторон, что создает основу для выработки неоднородными акторами консолидированного мнения о подходах к реализации ИС. *(п.2 паспорта специальности)*

3. Научная новизна структурных моделей проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС на предпроектной стадии, заключается в новом системном сочетании взаимодополняющих моделей архитектур соответствующих разным стратегиям разработки ИС, знаково-ориентированных графов и системных архетипов, что обеспечивает поддержку деятельности, ориентированную на обеспечение требуемого уровня функциональной надежности ИС. Новизна контурных и динамических моделей проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС, заключается в представлении системных архетипов совокупностью контурных моделей, весовые характеристики которых определяются математико-статистическими методами, что позволяет перейти от качественного описания ситуаций к математическим моделям, позволяющим получить количественные оценки (статические и динамические) отдельных ситуаций. *(п.п 1, 3 паспорта специальности)*

4. Научная новизна разработанных методов обеспечения функциональной надежности ИС заключается в следующем:

- предложенный метод построения многомерных зависимостей, позволяет представить ИС в виде многосвязного объекта совокупностью одномерных непараметрических регрессионных зависимостей. Метод позволяет исследовать поведение многосвязных объектов в случае, когда некоторые компоненты являются метрическими характеристиками, а некоторые представлены экспертными оценками. *(п.13 паспорта специальности)*

- предложенный метод оценки функциональной надежности информационных сервисов учитывает совокупность субъективных оценок разных пользователей, что позволяет обоснованно определить приоритетное направление повышения функциональной надежности сервисов. *(п.11 паспорта специальности)*

- предложенный метод структурного моделирования последствий отказов функциональных компонент ИС на основе совместного использования аппарата схем сопряжения и таблиц истинности формирует базис для построения структурных моделей отказов в рамках как нисходящего, так и восходящего подходов. Метод позволяет на предпроектной стадии провести оценку возможных последствий отказов функциональных компонент ИС по различным критериям функциональной надежности. *(п.11 паспорта специальности)*

5. Научная новизна предлагаемой модели проекта как многосвязного объекта управления заключается в одновременном использовании как исторических данных о ранее реализованных проектах, представленных в виде числовых характеристик, так и субъективных оценок акторов, причастных к реализации проектов, сопоставимость персонифицированного опыта акторов, накопленного при реализации прежних проектов, выражается посредством функциональных зависимостей. Предложенная формальная модель повышает обоснованность стратегических решений по организации проекта основными заинтересованными сторонами. Новизна предложенного подхода к оценке согласованности мнений неоднородных акторов на основе их субъективного восприятия заключается: во-первых, в формализации оценки значимости проблемных ситуаций неоднородными акторами. Проблемные ситуации

представляются ограниченным набором системных архетипов, а их значимость определяется посредством ранжирования. Во-вторых, в использовании системной модели «Дом качества - *HoQ*» для формирования на основе совокупности ранговых оценок разных акторов симметричной матрицы парных коэффициентов корреляции. Это, в свою очередь, позволило оценить взаимовлияние влияния мнений акторов посредством парциальных и множественных коэффициентов корреляции. (*п.13 паспорта специальности*)

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии теоретических основ, включая методические и модельные основы обеспечения функциональной надежности ИС в условиях разного видения потребительских свойств ИС разными заинтересованными сторонами, что создает основу для совершенствования системы управления функциональной надежностью ИС за счет уменьшения неопределенности состояния и прогнозирования последствий проблемных ситуаций, которые могут возникнуть на предпроектной стадии.

Практическая значимость

На основе предложенных принципов и подходов к обеспечению функциональной надежности выявлены факторы функциональной надежности ИС при формировании единого информационного пространства компании.

На основе полученных новых теоретических результатов разработана методика и программное обеспечение для оценки альтернативных вариантов реализации ИС, позволяющая оценить на предпроектной стадии предполагаемую удовлетворенность заказчика результатами проекта, а исполнителей – ходом реализации проекта в зависимости от бюджета и ограничений на длительность реализации проекта.

На основе предложенного метода структурного моделирования последствий отказов на основе аппарата схем сопряжения и таблиц истинности разработана методика и программное обеспечение для анализа моделей проектируемых компонентов ИС по критериям функциональной надежности, позволяющее построить структурные модели отказов функциональных компонент ИС на предпроектной стадии, обоснованно распределить ресурсы на обеспечение функциональной надежности, избавиться от трудоемкого и затратного по времени процесса ручного построения структурных моделей отказов.

Результаты работы внедрены и использованы в «Лукойл-Центрнефтепродукт», Научно-производственном предприятии «Полигон», Инжиниринговой компании «НПФ ЭИТЭК», в компании «Газпромнефть – Цифровые решения», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных научных результатов исследования подтверждается корректностью применения общепринятых научных подходов и положений, а также практической апробацией новых научных результатов, подтвержденной соответствующими актами внедрения.

Основные положения и результаты диссертационной работы регулярно докладывались и обсуждались на конференциях, наиболее значимые из которых: Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС), Россия, Самара (2014, 2016, 2018, 2019); Международная конференция “Computer Science and Information Technology”, (Austria, Vienna); Международная конференция “Information systems and technologies: achievements and perspectives”, Azerbaijan Republic, Sumgait, 2020; Мультиконференция по проблемам управления, Россия, Санкт-Петербург, 2020; Международная конференция «Электротехнические комплексы и системы» (ICOECS 2020, ICOECS 2021), Россия, Уфа; Международная научно-техническая конференция «Электротехнические комплексы и системы» Россия, Магнитогорск (UralCon 2023), Международная научная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» Россия, Уфа (ITIDS’2015, 2018, 2020, 2021, 2024) и др.

Связь исследований с научными программами

Исследования выполнены в рамках грантов РФФИ №19-08-00177 «Методологические, теоретические и модельные основы управления функциональной безопасностью аппаратно-программных комплексов в составе распределенных сложных технических систем», №19-08-00937 «Методы и модели интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении программными проектами, реализуемыми в среде производственных предприятий», в рамках основной части государственного задания ВУЗам № FEUE-2023-0007.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 40 основных научных работ, в том числе 16 статей в рецензируемых печатных изданиях из перечня, утвержденного ВАК (10 изданий - К1, из них 8 изданий, входит в перечень RSCI, 2 статьи опубликованы автором единолично, 6 изданий – К2); 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 монографии, 6 публикаций в международных журналах и изданиях, индексируемых базами *WoS* и *SCOPUS*, 10 работ в прочих изданиях.

Личный вклад автора

Результаты исследования, представленные в диссертации, получены лично автором под руководством научного консультанта. Из публикаций, подготовленных в соавторстве, в диссертации представлен материал, принадлежащий лично автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 216 наименований, изложенных на 318 страницах машинописного текста, содержит 165 рисунков и 36 таблиц. Объем приложений составляет 25 страниц.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному консультанту, профессору, доктору технических наук В. Е. Гвоздеву за огромный труд в проводимых в течение многих лет исследованиях, а также за всестороннюю помощь и поддержку при подготовке диссертации к защите.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии. Формулируются цель и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Изложены сведения о реализации и внедрении, степени достоверности и апробации работы, показана связь исследований с научными программами.

Первая глава посвящена анализу проблемной ситуации обеспечения функциональной надежности ИС, показано, что понятие «функциональная надежность» до настоящего времени трактуется различными исследователями неоднозначно.

Рассмотрены предпосылки возникновения проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности, показаны примеры последствий недостаточной функциональной надежности ИС.

Проведенный анализ эволюции подходов к обеспечению функциональной надежности позволил выделить факторы, влияющие на изменение парадигм обеспечения функциональной надежности, затрагиваются вопросы изменения масштабов и сложности систем. Рассмотрены основные подходы к обеспечению функциональной надежности ИС, включающие активный, реактивный и проактивный подходы.

Проведенный анализ современного состояния исследований, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС позволил сделать заключение о том, в исследованиях преобладает реактивный подход. Однако, реактивный подход не способен обеспечить требуемый уровень функциональной надежности ИС.

Существенно меньшая часть исследований сфокусирована на управлении дефектами, вызванными субъективными ошибками правообладателей и разработчиков, причастных к реализации проектов ИС. Существующие методы, ориентированные на реализацию проактивного подхода, носят, как правило, концептуальный характер.

В основном в современных исследованиях акцент сделан на разработку и улучшение методов проектирования, в то же время теоретические аспекты разрешения проблемных ситуаций, которые неизбежно возникают при реализации проектов ИС, получили значительно меньше внимания.

Сформулирована цель исследования, определен круг научных и практических задач, базовые положения исследований, сформирована основная научная идея работы: комплексное исследование проблемы обеспечения функциональной надежности информационных систем на предпроектной стадии на основе положений эвергетики.

Во второй главе сформулированы принципы и подходы к обеспечению функциональной надежности ИС как разновидности сложных систем, рассмотрены критерии сложности. Представленные критерии, принципы и подходы являются компонентами методологии обеспечения функциональной надежности ИС (рисунок 1).

Базовые компоненты методологии обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии включают в себя:

- концептуальные основы обеспечения функциональной надежности, в основе которых интеграция нормативного обеспечения, общенаучных подходов и принципов;
- методические основы обеспечения функциональной надежности, включающие метод построения многомерных зависимостей, метод структурного моделирования последствий отказов, метод оценки состояния функциональной надежности на основе субъективных оценок пользователей;
- модельные основы обеспечения функциональной надежности в виде комплекса моделей, предполагающего последовательную разработку системных, структурных, контурных и динамических моделей;
- инструментальные основы обеспечения функциональной надежности, включающие методики и информационные сервисы, реализованные на основе разработанных методов и моделей.

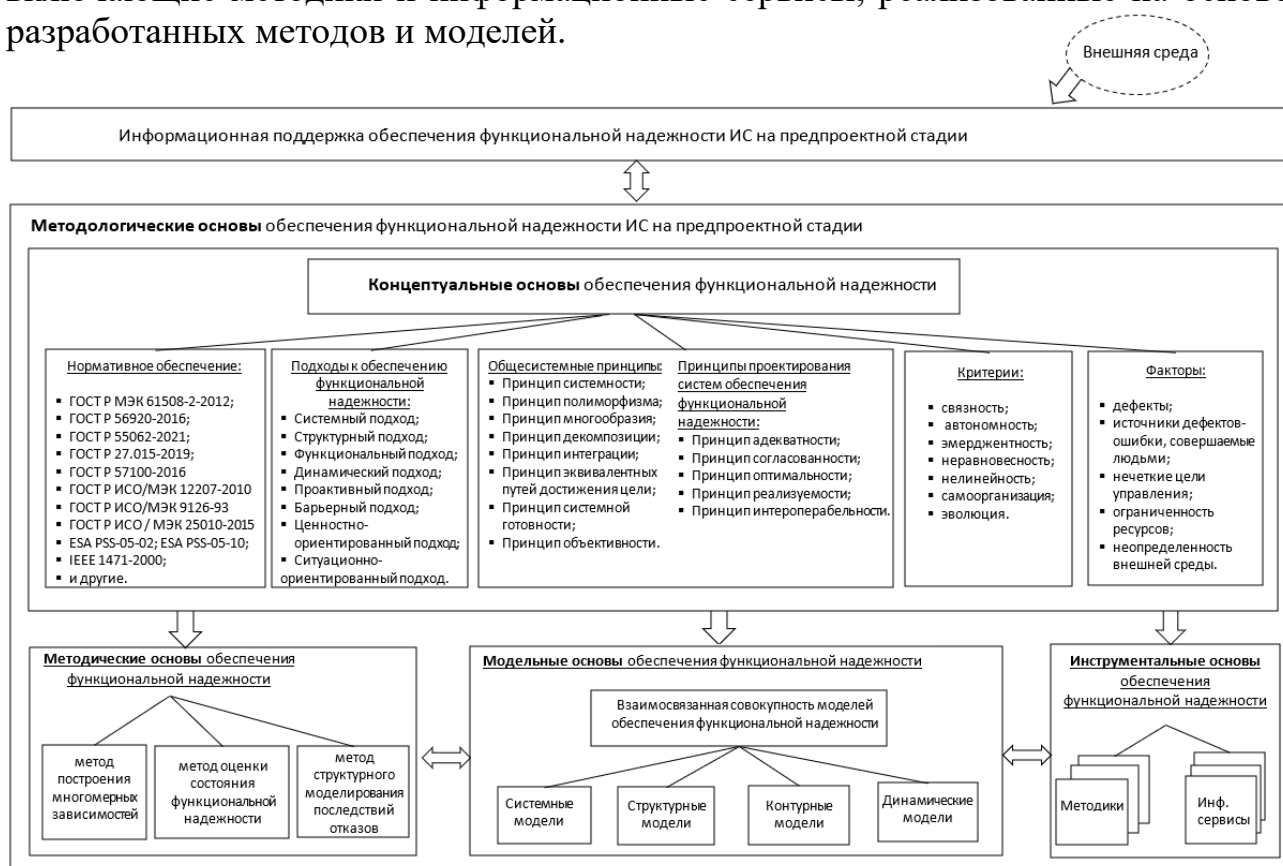


Рисунок 1. Методология обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии

Фокусом методологии является:

- с одной стороны, выделение общих свойств ИС со сложными системами, что служит основанием для научно-обоснованной адаптации известных в теории систем подходов управления надежностью в область обеспечения функциональной надежности ИС;
- с другой стороны, выявление специфических особенностей ИС, позволяющих выделить функциональную надежность ИС в качестве самостоятельного предмета исследований, что служит основанием разработки специальных подходов, методов и инструментов исследования.

Концептуальная основа исследования опирается на следующую систему взглядов.

1) Обеспечение функциональной надежности ИС в составе систем поддержки сетецентрического управления распределенными сложными системами относится к классу задач управления в условиях динамических нечетких целей управления.

2) ИС представляют собой разновидность сложных субъектоцентрических систем. Это обстоятельство служит обоснованием для научно-обоснованной адаптации известных подходов к модельному описанию проблемных ситуаций, возникающих при управлении сложными системами разной природы в область обеспечения функциональной надежности ИС. Модельное описание проблемных ситуаций служит основанием для информационной поддержки принятия решений по их урегулированию.

3) Критическим фактором функциональной надежности являются дефекты. Источниками дефектов являются ошибки, допускаемые субъектами, причастными к разработке и использованию ИС.

4) Основу обеспечения функциональной надежности составляет комплексное использование сведений, получаемых из разных источников: структурный анализ архитектур систем обеспечения функциональной надежности и внутреннего устройства ИС, результаты обработки исторических данных (включая метрические характеристики), связанные с проявлением дефектов разной природы, экспертные оценки субъектов, причастных к разработке ИС.

5) Функциональная надежность определяется количеством дефектов (проявившихся и латентных), возникших на разных стадиях жизненного цикла, начиная с осознания наличия проблемной ситуации, для урегулирования которой необходимо использование ИС. Моменты проявления латентных дефектов и моменты их возникновения распределены в пространстве и во времени.

Цикл обеспечения функциональной надежности (рисунок 2), назначение данной модели - выделение базовых компонентов непрерывного процесса совершенствования обеспечения функциональной надежности ИС.



Рисунок 2. Цикл обеспечения функциональной надежности

Содержание модели состоит в том, что по мере изменения роли, масштабов и сложности ИС, постоянно вырастают требования к функциональной надежности. Это требует постоянного развития теоретических основ, технологических и инструментальных средств обеспечения функциональной надежности. Данная модель построена по аналогии с Циклом Деминга в науке об управлении качеством.

Подробно рассмотрены свойства дефектов как предмета исследования.

Дефект - состояние ИС, которое не соответствует заявленным требованиям, спецификациям или ожиданиям пользователя (фактор, снижающий ценность информационных сервисов для потребителей).

Дефекты являются неотъемлемой составляющей субъектоцентрических систем, к числу которых относятся ИС.

Дефекты - сложные (многосвязные) объекты управления. Эволюция дефектов на предпроектной стадии и в ходе реализации проектов (рисунок 3) означает, что при переходе на последующую фазу жизненного цикла существовавшие ранее дефекты в системе управления проектом и в продукте трансформируются в дефекты иной формы как в системе управления, так и в продукте.

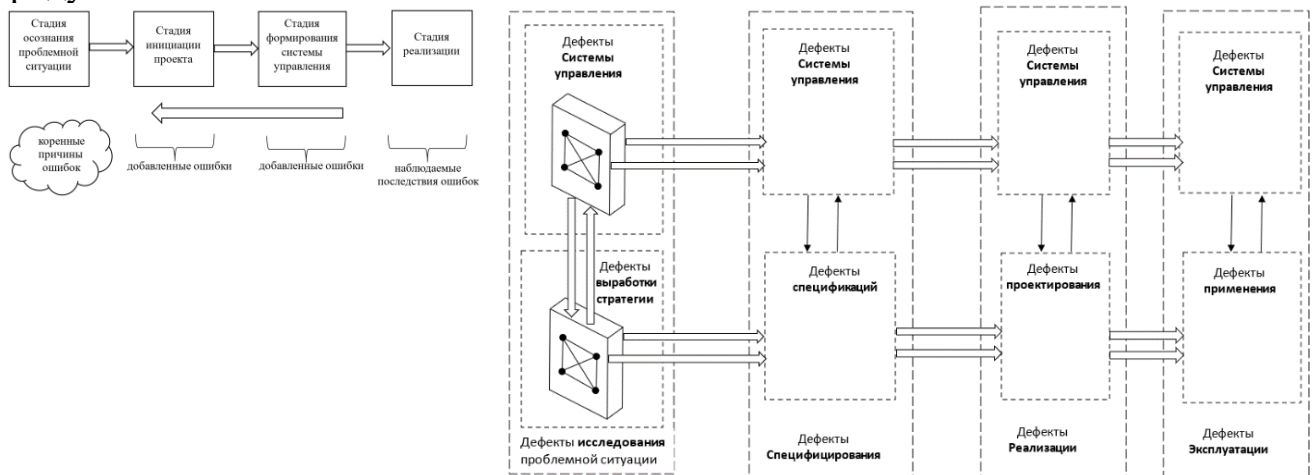


Рисунок 3. Метаморфоза ошибок/дефектов

Разработана системная модель, соответствующая сквозному процессу обращения с дефектами на разных стадиях жизненного цикла. Рассматривается двухкомпонентный процесс обеспечения функциональной надежности (рисунок 4, рисунок 5).

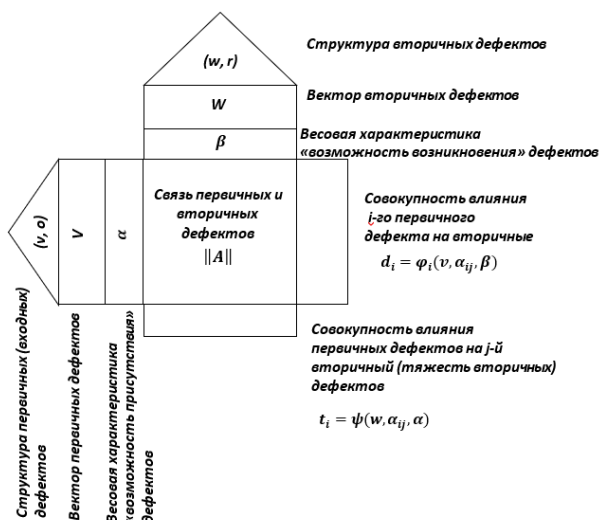


Рисунок 4. Содержание NoQ
<Дефекты>

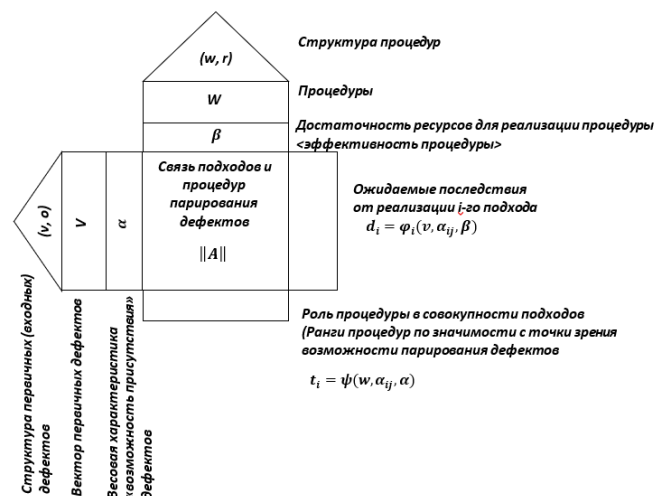
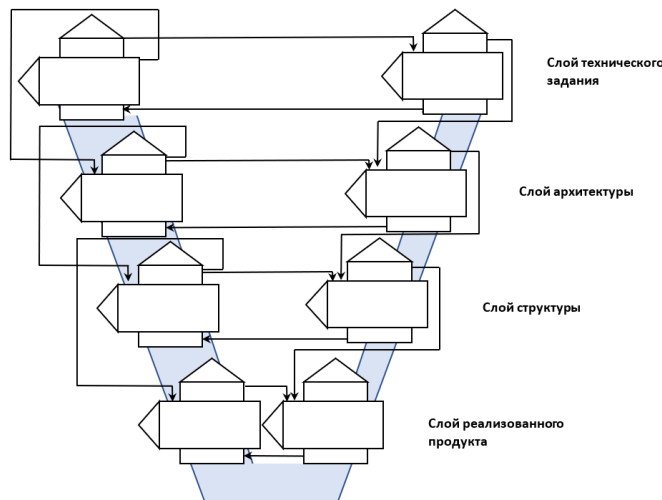


Рисунок 5. Содержание NoQ
<Парирование дефектов>

Первая компонента связана с анализом причин возникновения дефектов и видом дефектов (рисунок 4). Вторая компонента связана с формированием подходов к предупреждению возникновения, выявления и устранения дефектов (рисунок 5). Унифицированным способом представления обеих компонент является *HoQ*.

Моделью процесса взаимодействия двух компонент является модель, аналогичная *V*-модели жизненного цикла в сочетании с *QFD* (рисунок 6).



Формальная математическая

модель: $HoQ: \|V^i\| \times \|A^i\| \rightarrow \|W^i\|$,

где

$\|V^i\|$ – вектор-столбец,

соответствующий «крыльцу» *HoQ*;

$\|A^i\|$ – матрица, соответствующая
«комнате» *HoQ*;

$\|W^i\|$ – вектор-столбец,
соответствующий «крыше» *HoQ*.

Рисунок 6. Системная модель, соответствующая сквозному процессу обращения с дефектами

Предложенная системная модель, соответствующая сквозному процессу обращения с дефектами на разных стадиях жизненного цикла, объединяет в себе *V*-модель жизненного цикла и подход *QFD*. Модель обеспечивает единый формат описания преобразований дефектов при переходах на разные стадии жизненного цикла.

Разработаны системные модели предпроектной стадии на основе положений эвергетики (рисунок 7, рисунок 8).

В трудах профессора В.А. Виттиха «эвергетика – ценностно-ориентированная наука об организации процессов управления в социотехнических системах и в человеческом обществе в целом».

Согласно положениям эвергетики проблемная ситуация не является объектом управления, заданным априори, а формируется в сознании неоднородных акторов, причастных к необходимости ее совместного урегулирования.

Под проблемной ситуацией, понимается ситуация невозможности достичь какой-либо насущной цели с использованием наличных ресурсов и с учётом существующих ограничений (временных, материальных, организационных, интеллектуальных и др.).

Модельное описание проблемных ситуаций создает основу решения прямых задач обеспечения функциональной надежности: исследование проблемных ситуаций, обусловленных наличием различных дефектов в организации проектов и в продуктах, позволяет выработать консолидированное мнение неоднородных акторов.

Формирование стратегии представляет собой многоэтапный процесс, реализация которого ориентирована на решение следующих ключевых задач: осознание наличия проблемной ситуации и ее описание; представление проблемной ситуации в виде объекта управления; формирование неоднородными акторами консолидированного подхода к урегулированию проблемной ситуации.



Рисунок 7. Системная модель предпроектной стадии

К числу причин возникновения дефектов в спецификации внешнего облика помимо ошибок, обусловленных мыслительной деятельностью субъектов, можно отнести недостаток знаний об истинных причинах возникновения проблемной ситуации, ограниченность понятийного отображения проблемной ситуации, недостаточная потенциальность моделей, используемых для представления проблемной ситуации в виде многосвязного объекта управления. В совокупности выделенные причины формируют системную составляющую дефектов в спецификации внешнего облика ИС.

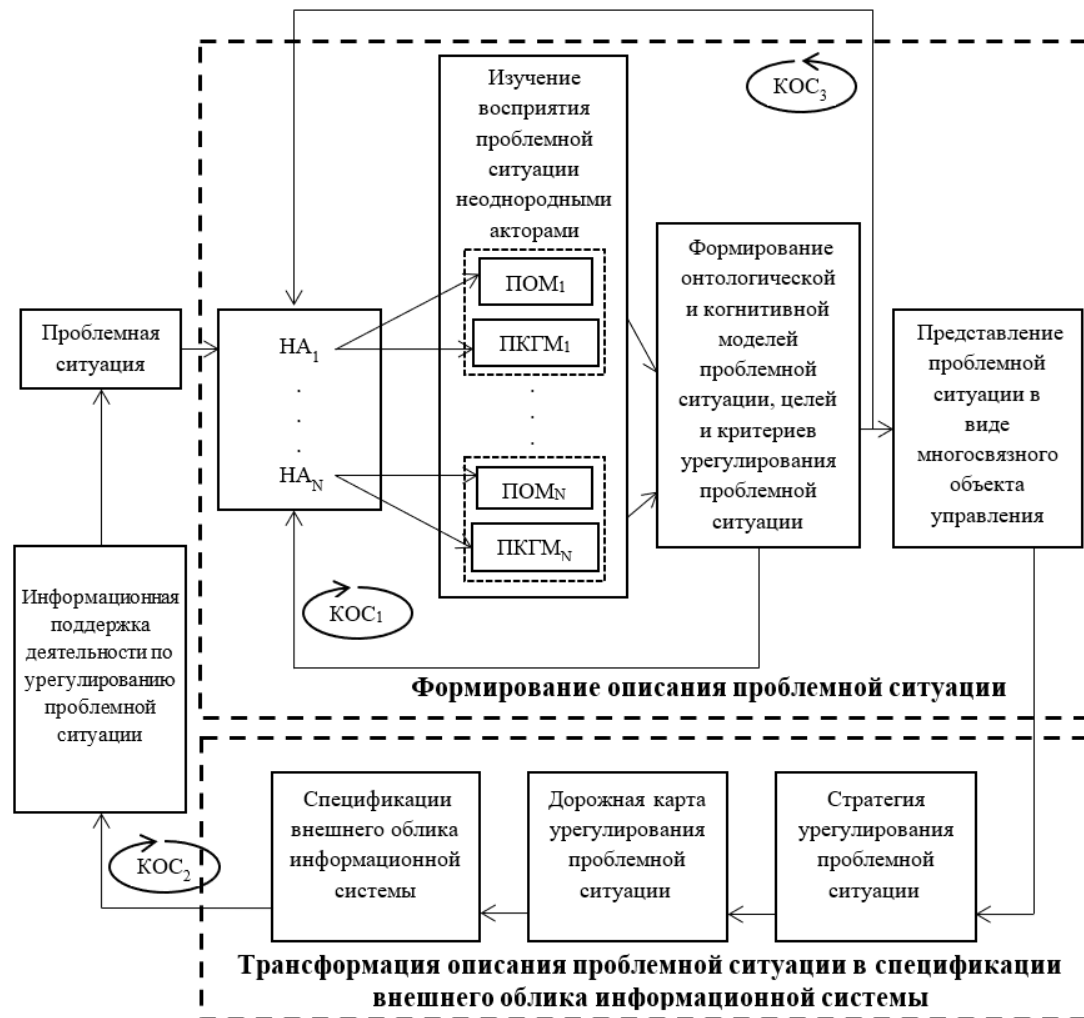


Рисунок 8. Системная модель формирования понятийного пространства, стратегии и внешнего облика ИС

Рассмотрено содержание системных архетипов в задачах обеспечения функциональной надежности ИС. Описание проблемных ситуаций посредством системных архетипов способствуют её структуризации, создает предпосылки для её адекватного восприятия и как следствие выработки рациональных подходов к её урегулированию. Полученные при исследовании структурированных проблемных ситуаций результаты создают основу для построения в различной степени формализованных знаковых моделей. Поскольку дефекты начинают возникать на предпроектной стадии, важно распознать ситуационную проблему для чего и предложен аппарат системных архетипов.

Третья глава посвящена вопросам построения моделей факторов, определяющих функциональную надежность ИС. Для описани пространства проблемных ситуаций используется набор системных архетипов, описанный в литературе.

Разработана взаимосвязанная совокупность структурных моделей обеспечения функциональной надежности ИС. Наличие архетипа позволяет построить разные модели для разных стратегий борьбы с дефектами (с барьерами и без барьеров и др.).

Исследование свойств подсистем обращения с дефектами на основе системных архетипов предполагает реализацию следующих этапов:

1) построение архитектуры подсистемы в соответствии с выбранной стратегией обращения с дефектами;

2) построение на основе архитектуры знаково-ориентированной модели, исходя из того, что концепты и отношения между ними являются многосвязными объектами;

3) исследование свойств полученной знаково-ориентированной модели на основе соотношения: $\vec{c}_{k+1} = \vec{c}_k * \|H\|$,

где \vec{c}_{k+1} – вектор состояния узлов знакоориентированного графа на (k+1)-й итерации (k=0,1,2, ...);

$\|H\|$ – матрица, характеризующая отношения между узлами знаково-ориентированного графа.

Рассматривались различные стратегии предотвращения дефектов. Пример реализации одной из стратегий показан на рисунке 9. Идея функционирования такой системы следующая: защитные барьеры не уменьшают количества латентных дефектов, но способствуют сохранению ресурсов за счет того, что препятствуют преобразованию дефектов в негативные последствия.

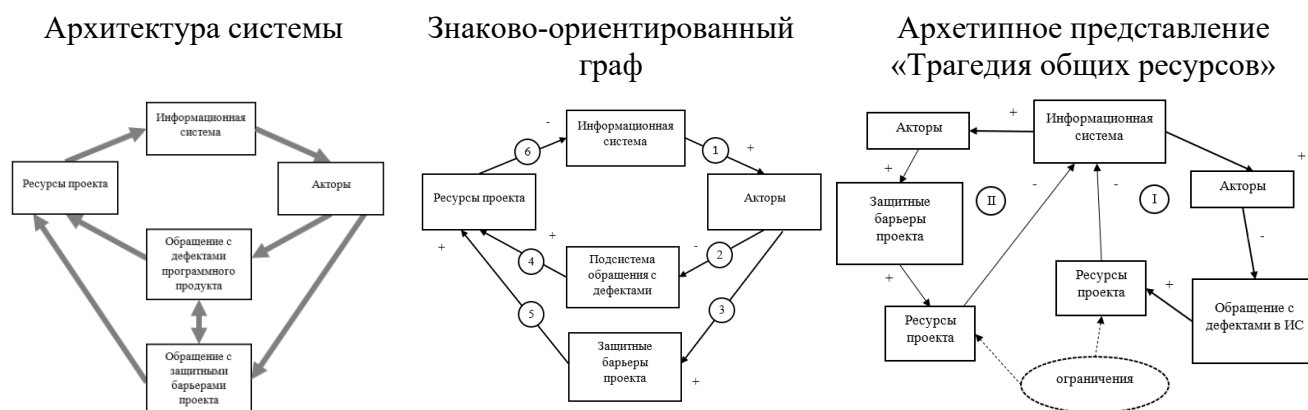


Рисунок 9. Взаимосвязанная совокупность структурных моделей

Предложена формальная модель ошибок предпроектной стадии (рисунок 10), выполнена ее верификация. Выявлены ключевые факторы возникновения ошибок.

Показано, что существует предел возможностей по предупреждению возникновения ошибок и устранения дефектов (архетип «Пределы роста»), обусловленный как неопределенностью проблемной ситуации, так и компетентностью разработчиков.

Предложенная модель позволяет сделать следующие заключения:

1) необходим баланс в распределении усилий по борьбе с ошибками разной природы, невозможно обеспечить высокое качество спецификаций только лишь за счет борьбы с ошибками, не совершенствуя при этом организацию системы исследования проблемной ситуации;

2) дефекты, с одной стороны, являются фактором, снижающим ценность ИС, с другой стороны, являются фактором совершенствования системы изучения проблемной ситуации за счет получения новых знаний.

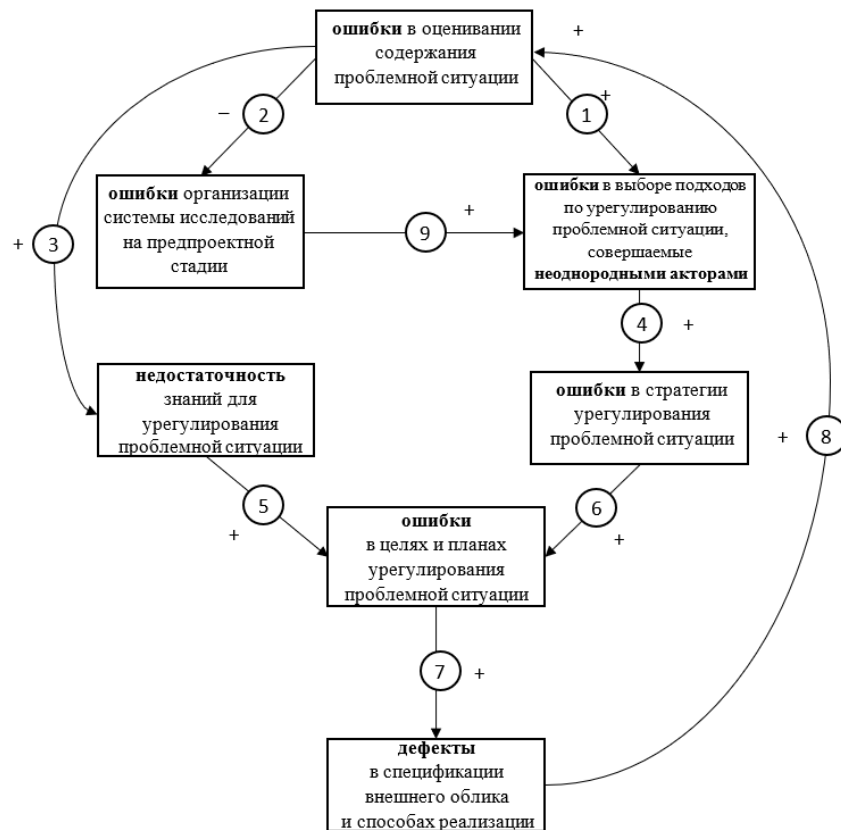


Рисунок 10. Формальная модель ошибок предпроектной стадии

Разработана модель формирования структуры интегрального показателя, характеризующего совокупное влияние факторов, как способствующих, так и препятствующих повышению функциональной надежности в рамках ресурсного подхода и системного архетипа «Пределы роста» (рисунок 11).

В рамках ресурсного подхода предложен способ представления в едином виде (законе распределения временных затрат на реализацию/парирование действия) различных факторов, влияющих на состояние объекта управления. Сочетание системных архетипов, ресурсного подхода и модели *HoQ*, позволяет повысить степень формализации исследований, ориентированных на оценку влияния качества управления проектом на функциональную надежность ИС.

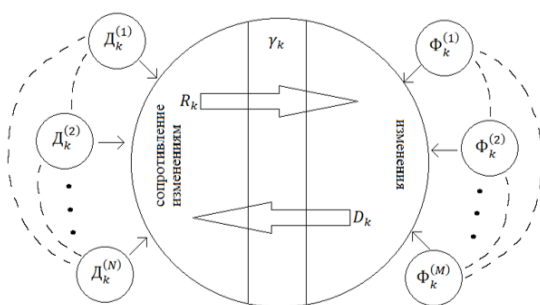


Рисунок 11. Системный архетип «Пределы роста»

$D_k^{(i)}, (i = \overline{1; N})$ факторы, препятствующие устранению дефектов;

$\Phi_k^{(j)}, (j = \overline{1; M})$ факторы, способствующие устранению дефектов;

k признак фазы жизненного цикла ИС;

R_k, D_k - интегральные характеристики, соответствующие факторам, препятствующим и способствующие устранению дефектов.

Линия, разделяющая круг, соответствует интегральному показателю γ_k .

В соответствие системной модели можно поставить структурную модель «Дом качества» (*House of Quality – HoQ*) (рисунок 12).

Структурная модель «Дом качества»:

«Крыльцо» - вектор, компонентами которого являются факторы $\{D_k\}_1^N$ либо $\{\Phi_k\}_1^M$.

Векторам $\|D_k\|_1^N$, $\|\Phi_k\|_1^M$ ставятся в соответствие матрицы $\|A^{(D)}\|$ либо $\|A^{(\Phi)}\|$, характеризующие взаимное влияние факторов; «Крыша» - компоненты вектора $\|r_k\|_1^L$ (соответствующего факторам $\{D_k\}_1^N$), либо компоненты вектора $\|d_k\|_1^Q$ (соответствующего факторам $\{\Phi_k\}_1^M$).

$\|r_k\|_1^L$ и $\|d_k\|_1^Q$ служат основой вычисления интегральных характеристик R_k , D_k .

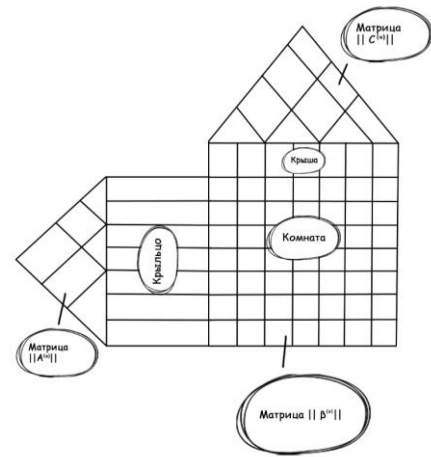


Рисунок 12. Структурная модель «Дом качества»

HoQ , соответствующие факторам $\{D_k\}_1^N$ и $\{\Phi_k\}_1^M$, могут быть представлены в виде трех матриц $\|A^{(\cdot)}\|$, $\|B^{(\cdot-\cdot)}\|$, $\|C^{(\cdot)}\|$ и векторов факторов:

$$\begin{cases} HoQ^{(D)}: (\|D_k\|_1^N, \|A^{(D)}\|, \|B^{(D-r)}\|, \|C^{(r)}\|) \\ HoQ^{(\Phi)}: (\|\Phi_k\|_1^M, \|A^{(\Phi)}\|, \|B^{(\Phi-d)}\|, \|C^{(\Phi)}\|) \end{cases}$$

Интегральный показатель функциональной надежности, формируемый в результате действия как развивающих, так и препятствующих развитию факторов представляется в виде: $\gamma_k = \exp R_k - D_k$.

Разработаны контурные модели проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС.

В соответствии с контурным представлением, поведение системы определяется сложным взаимодействием усиливающих и ослабляющих контуров, возникающих в системах с обратными связями. Представление проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности, в виде контурных моделей позволяет перейти от качественного описания ситуаций к математическим моделям, позволяющим получить количественные оценки отдельных ситуаций. Контурная модель, соответствующая архетипу «Пределы роста» (рисунок 13) показана на рисунке 14.

Входными параметрами модели являются:

x_1 - факторы, стимулирующие повышение надежности ИС;

x_2 - факторы, препятствующие повышению надежности ИС;

Выходным параметром является y_1 - оценка уровня надежности, т.е. эмерджентные свойства, возникающие в результате сложных взаимодействий стимулирующих и препятствующих факторов.

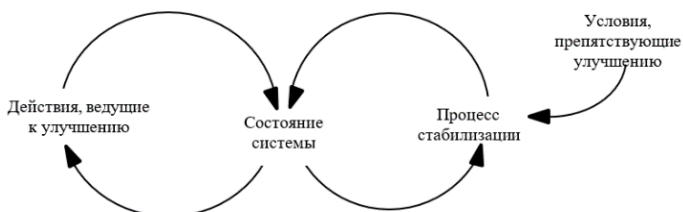


Рисунок 13. Системный архетип «Пределы роста»

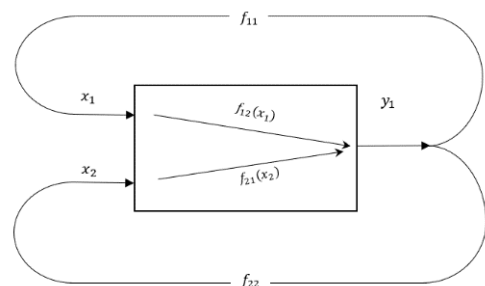


Рисунок 14. Контурная модель

Содержание этого архетипа применительно к задачам обеспечения функциональной надежности, сводится к тому, что, с одной стороны, имеет место стремление развивать и совершенствовать потребительские свойства ИС, в том числе за счет предотвращения негативных последствий от проявления латентных дефектов (развивающий цикл, действия, ведущие к улучшению). С другой стороны, в силу того что устранение и предотвращение возникновения дефектов требует использования ресурсов проекта (при том, что не добавляет новых функциональных возможностей ИС), возникает противодействие расходованию ресурсов на решение задач обеспечения надежности (стабилизирующий цикл, условия, препятствующие улучшению).

Предложены динамические модели проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности, проведены исследования влияния соотношения показателей состояния ИС $h_k^{(t)}$ и организации проекта γ_k (фрагмент результатов показан рисунке 15).

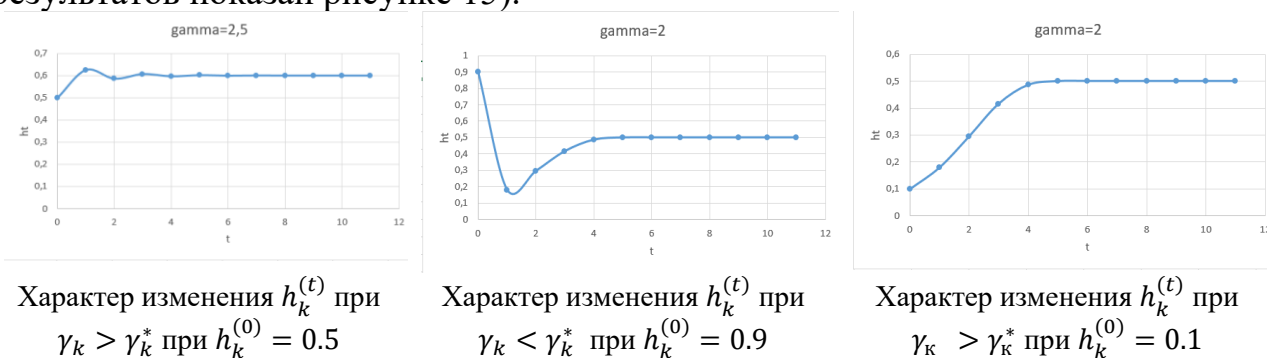


Рисунок 15. Фрагмент результатов исследования влияния соотношения показателей состояния ИС $h_k^{(t)}$ и организации проекта γ_k

Содержательно $0 < h_k^{(t)} < 1$ соответствует тому, что для пользователя представляют интерес лишь системы, содержащие работоспособные функции.

Наличие взаимосвязанной совокупности моделей позволяет оценить последствия различных организационных решений, иными словами, создают основу для предупреждения возникновения латентных дефектов организационной природы, влекущих за собой наиболее тяжелые негативные последствия.

Четвертая глава посвящена методическим основам обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии. Разработан комплекс методов обеспечения функциональной надежности, включающий: метод построения многомерных зависимостей; метод оценки состояния функциональной надежности информационных сервисов с учетом субъективных оценок пользователей; метод структурного моделирования последствий отказов.

Предложен *метод построения многомерных зависимостей*. Основу метода составляет преобразование исходных данных, изначально представляемых в разной форме, к виду закона распределения непрерывной случайной величины.

Это делает возможным построение на основе попарного исследования законов распределения случайных величин совокупности одномерных непараметрических регрессионных зависимостей. Полученные регрессионные зависимости служат основой формирования таблицы совместно наблюдаемых значений независимой и зависимой случайных величин, что позволяет строить многомерные регрессионные зависимости известными методами.

При решении практических задач приходится сталкиваться с ситуацией, когда формирование таблиц совместно наблюдаемых значений встречает ряд трудностей. В таких условиях недостаток измерительных данных приходится компенсировать экспертными оценками разного вида: в виде ожидаемых значений; в виде интервала возможных значений, в виде совокупности ожидаемых значений и интервала возможных значений случайной величины. Фрагмент полученных результатов в виде многомерных зависимостей показан на рисунке 16.

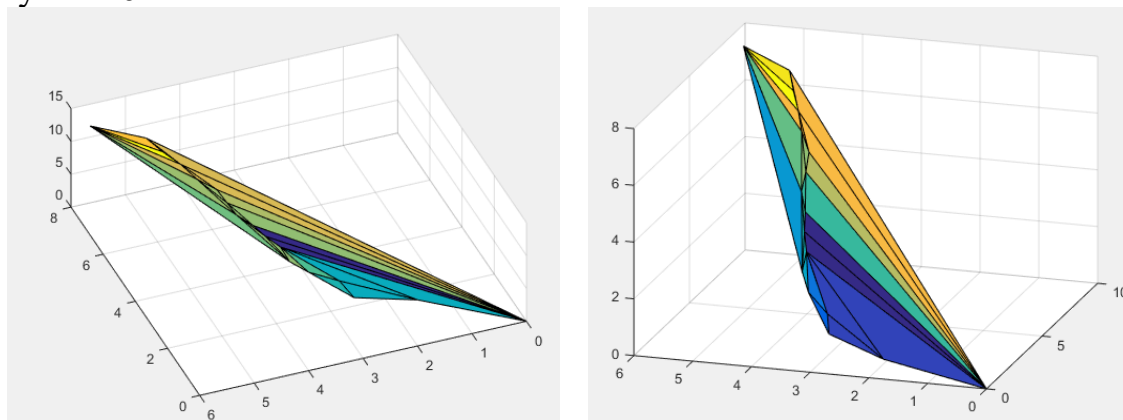


Рисунок 16. Построенные многомерные функциональные зависимости

Предложенный метод позволяет построить многомерные регрессионные зависимости в случае, когда исходные данные, соответствующие разным компонентам векторов независимой и зависимой переменных, представляются в виде результатов измерений, либо в виде разных по форме экспертных оценок.

Разработан *метод оценки функциональной надежности информационных сервисов* с учетом субъективных оценок пользователей.

Одним из базовых положений управления функциональной надежностью ИС является постоянное отслеживание соответствия потребительских свойств целям и ценностям пользователей, что, в частности, предполагает постоянное отслеживание степени удовлетворенности пользователей надежностью ИС.

При реализации сетецентрического управления и создании единого информационного и управленческого пространства целесообразно рассматривать не функции, а сервисы. Основная идея подхода, состоящего в обеспечении функциональной надежности информационных сервисов, заключается в учете восприятия свойств сервисов пользователями для того, чтобы определить, как эти сервисы улучшить. Особенность такого подхода заключается в учете субъективной составляющей при оценивании надежности одних и тех же сервисов разными пользователями.

Под профилем понимается полное множество альтернатив (например, множество альтернативных категорий пользователей, функций и т.п.), для каждой из которых существует вероятность появления (рисунок 17). Содержание профилей сводится к стремлению взглянуть на ИС глазами пользователей.

Одной из важнейших характеристик, которую необходимо учитывать при распределении ресурсов, в частности временных, на разработку новых информационных сервисов и улучшение уже существующих, является степень покрытия бизнес-задач информационными сервисами.

Степень покрытия (СП) бизнес – задач информационными сервисами (ИС):

$$СП_i^{(БЗ)} = \frac{ИС_i^{(P)}}{ИС_i^{(P)} + ИС_i^{(ПП)}},$$

$ИС_i^{(P)}$ – число реализованных ИС;
 $ИС_i^{(ПП)}$ – число предполагаемых к реализации ИС.

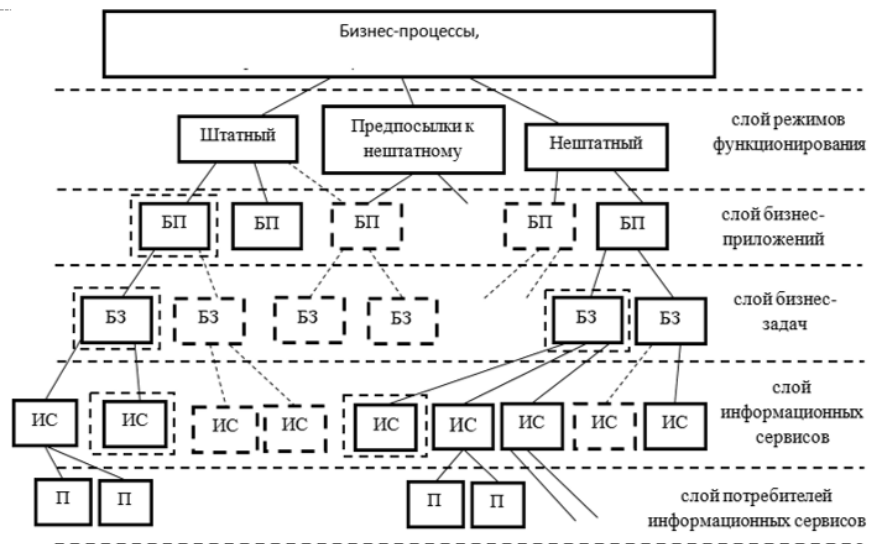


Рисунок 17. Профиль информационных сервисов

Для оценивания характеристик надежности на основе субъективных оценок пользователей предлагается использовать подход, основанный на функции принадлежности лингвистической шкалы (рисунок 18).

Совокупная оценка надежности:

$$D(m) = \frac{\sum_{k=1}^{N_m} \mu_k^{(l)} * r_l^{(k)}}{\sum_{k=1}^{N_m} \mu_k^{(l)}},$$

N_m – количество пользователей, принадлежащих m -й целевой группе;
 $\mu_k^{(l)}$ – степень уверенности k -го пользователя в даваемой оценке.

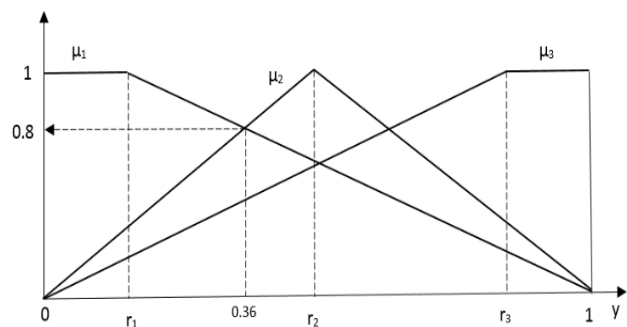


Рисунок 18. Функция принадлежности

Лингвистическая шкала в терминах, которой пользователи, принадлежащие к одной и той же m -й целевой группе, оценивают свою удовлетворенность потребительскими свойствами продукта имеет вид: {низкая; средняя; высокая}. Каждому значению шкалы соответствует своя нечеткая функция принадлежности μ , определенная на оси вероятности безотказной работы информационного сервиса. Каждый потребитель выражает свою точку зрения о надежности информационного сервиса и своей степени уверенности в этом. В диссертации для выбора функции принадлежности предлагается подход, основанный на принципе объективности (принцип максимизации энтропии). Предлагается использовать функцию принадлежности треугольного вида с одинаковыми границами, совпадающими с границами оси $y \in [0;1]$.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет получить количественные оценки надежности информационных сервисов на основе экспертных оценок пользователей. Практической направленностью предлагаемого метода является определение приоритетных направлений повышения функциональной надежности.

Предложен метод структурного моделирования последствий отказов функциональных компонент ИС. Совместное использование схем сопряжения агрегатов и таблиц истинности создает основу для построения структурных моделей, обеспечивающих моделирование отказов.

Совместное использование схем сопряжения и таблиц истинности создает основу для построения структурных моделей, в рамках как нисходящего (дерево неисправностей *FTA*, модели причинно-следственных связей *Fishbone*), так и восходящего подходов к исследованию функциональной надежности (дерево событий *ETA*). Подход позволяет провести оценку возможных последствий отказов в ИС по различным критериям функциональной надежности для различных схем построения ИС на предпроектной стадии.

На рисунке 19 показан пример построения схемы сопряжения, каждый из этапов представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих функциональных компонентов.

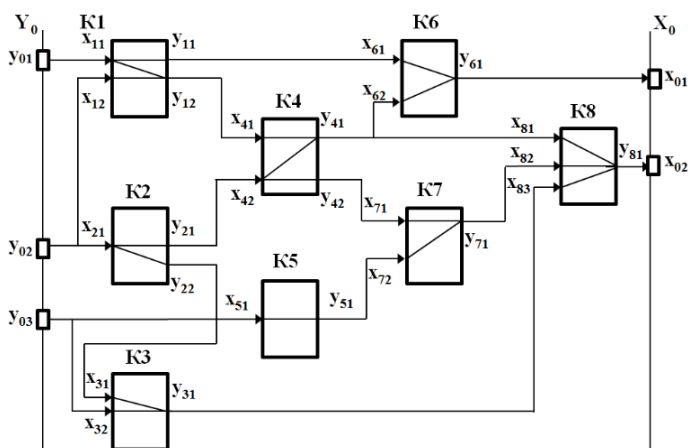


Рисунок 19. Схема сопряжения

В свою очередь, каждому из компонентов ставится в соответствие таблица истинности (примеры таблиц истинности, соответствующих компонентам K1 и K8, представленных на рисунке 19, представлены на рисунке 20). В таблицах «0» соответствует ошибке, «1» корректному состоянию.

x_{km} — входные контакты компонентов и внешней среды;
 y_{km} — выходные контакты компонентов и внешней среды;
 k — признак компонента (для внешней среды $k=0$);
 m — признак входа/выхода компонента.

K1	inputs		outputs		K8	inputs			outputs
	X11	X12	Y11	Y12		X81	X82	X83	Y81
	0	0	0	0		0	0	0	0
	0	1	0	0		0	0	1	0
	1	0	1	0		0	1	0	0
	1	1	1	1		0	1	1	0
						1	0	0	0
						1	0	1	0
						1	1	0	0
						1	1	1	1

Рисунок 20. Таблица истинности

С целью разноаспектного анализа функциональной надежности ИС на предпроектной стадии предложена схема анализа событий в рамках *Anticipatory Failure Determination (AFD)* в виде систематической процедуры для выявления уязвимых мест в ИС (т.е. выявление мест, в которых целесообразно устанавливать «барьеры»).

Пятая глава посвящена разработке математико-статистических моделей для определения базовых характеристик проекта ИС как многосвязного объекта на основе исторических данных о реализованных проектах.

Основу построения статической модели проекта (рисунок 21) составляет рассмотрение его как многосвязного объекта управления.

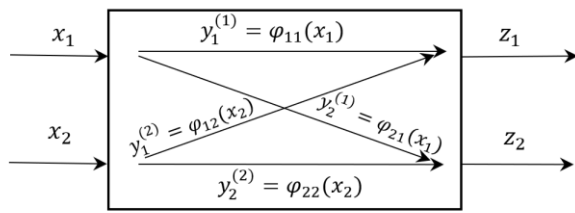


Рисунок 21. Модель проекта как многосвязного объекта управления

Входные параметры:

x_1 – бюджет проекта;

x_2 – длительность реализации проекта.

Выходные параметры:

z_1 – характеристика удовлетворенности пользователей/заказчиков;

z_2 – характеристика удовлетворенности разработчиков.

Характеристики $z_j (j = 1, 2)$ и параметры $x_i (i = 1, 2)$ связаны функциональными зависимостями $z_j = \Phi_j(x_1, x_2)$.

Эмпирические функциональные зависимости $y_j^{(i)} = \varphi_{ij}(x_i)$, $(i, j = 1, 2)$, соответствуют прямым и перекрестным связям многосвязного объекта, являются строгими, строятся на основе измерительных данных и экспертных оценок относительно потребительских свойств созданных продуктов и хода ранее реализованных проектов.

Совместное влияние входных характеристик x_i на выходные определяется на основе функциональных зависимостей, характеризующих прямые и перекрестные связи:

$$y_j^{(i)} = \varphi_{ij}(x_i) : A^{(j)} : \{y_j^{(i)} = \varphi_{ij}(x_i)\} \rightarrow z_j = \Phi_j(x_1, x_2), i, j = 1, 2$$

$A^{(j)}$ – оператор свертки, соответствующий j -му выходному параметру модели.

Область допустимых значений для характеристики удовлетворенности y_j – интервал $y_j \in [0, 1]$, $j = 1, 2$. Нижняя граница интервала соответствует варианту, когда субъекты (потребитель/исполнитель) абсолютно не удовлетворены результатами /ходом проекта. Верхняя граница интервала соответствует их абсолютной удовлетворенности.

Следует учитывать, что во взаимоотношениях субъектов (потребителей результатов проектов и исполнителей проектов) ситуация достаточно противоречивая. С точки зрения ресурсного обеспечения (интегрально выражаемого бюджетом проекта) потребители стремятся сократить величину бюджета; исполнители же – увеличить.

Формально описать такую ситуацию можно посредством системного архетипа «Случайные противники» (рисунок 22). Этому архетипу может быть поставлено в соответствие контурное описание (рисунок 23), основу которого составляет точка зрения на систему управления проектом как на многосвязную систему. Далее математическими методами определяются границы, в которых может изменяться бюджет проекта при наличии ограничений на длительность реализации проекта, а также на уровень удовлетворенности исполнителей проекта и потребителей результатов проекта.

Результаты демонстрационных вычислительных экспериментов (фрагмент результатов представлен на рисунке 24) показывают возможность прогнозировать характер проявления проблемных ситуаций в зависимости от организации проекта.

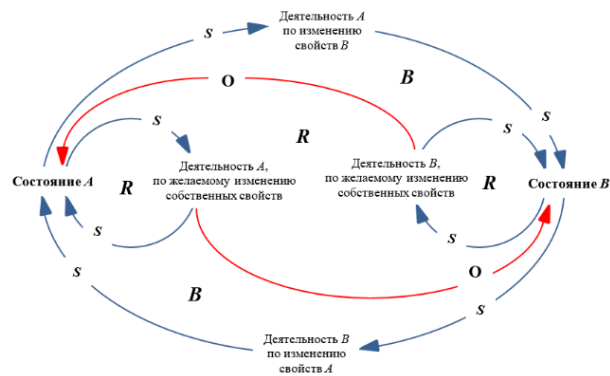


Рисунок 22. Архетип «Случайные противники»

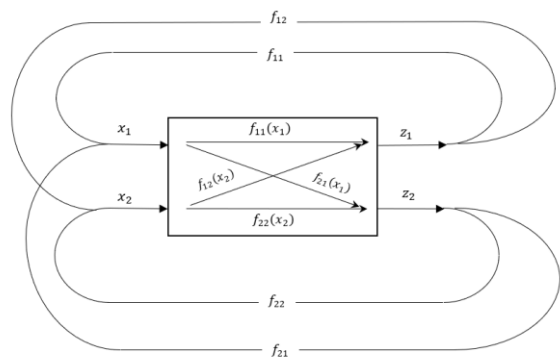


Рисунок 23. Контурное описание архетипа «Случайные противники»

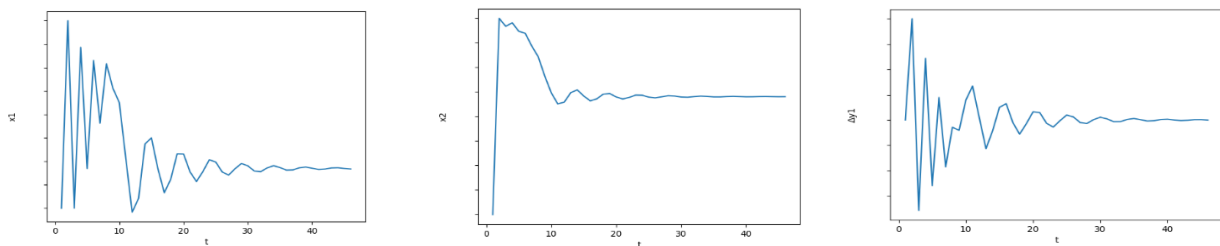


Рисунок 24. Пример результатов моделирования динамики изменения выходных параметров

Разработана формальная схема оценки согласованности мнений неоднородных акторов. В качестве инструмента оценки согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии используются системные архетипы, модель «Дом качества» (*NoQ*) (рисунок 25), а также коэффициенты корреляции: ранговые, парциальные и множественные. Изменение значений коэффициентов корреляции показано на рисунке 26.

		0.17	-0.44	0.37
	Актор 1	Актор 2	Актор 3	
Архетип 1 «Задержка действий»	5	3	3	
Архетип 2 «Пределы роста»	8	1	6	
Архетип 3 «Подмена проблемы»	4	2	5	
Архетип 4 «Размывание целей»	10	6	1	
Архетип 5 «Эскалация»	3	7	9	
Архетип 6 «Успех к успеху»	7	10	10	
Архетип 7 «Трагедия общих ресурсов»	1	5	7	
Архетип 8 «Симптоматические решения»	9	8	2	
Архетип 9 «Рост и недоинвестирование»	2	4	4	
Архетип 10 «Случайные противники»	6	9	8	

«Дом качества» до начала обсуждений проблемной ситуации

		0.91	0.88	0.88
	Актор 1	Актор 2	Актор 3	
Архетип 1 «Задержка действий»	4	1	2	
Архетип 2 «Пределы роста»	3	4	1	
Архетип 3 «Подмена проблемы»	1	3	3	
Архетип 4 «Размывание целей»	2	2	4	
Архетип 5 «Эскалация»	6	5	7	
Архетип 6 «Успех к успеху»	7	7	5	
Архетип 7 «Трагедия общих ресурсов»	5	6	6	
Архетип 8 «Симптоматические решения»	8	9	9	
Архетип 9 «Рост и недоинвестирование»	10	10	10	
Архетип 10 «Случайные противники»	9	8	8	

«Дом качества» после второго дискурса

Рисунок 25. – Вид *NoQ* на разных этапах дискурсов

Коэффициенты корреляции являются индикаторами степени схожести точек зрения неоднородных акторов на факторы проблемной ситуации. Множественные коэффициенты корреляции рассматриваются как характеристики степени согласованности мнений отдельного актора с мнениями других акторов. Парциальные коэффициенты корреляции рассматриваются как степень согласованности мнений между парами акторов.

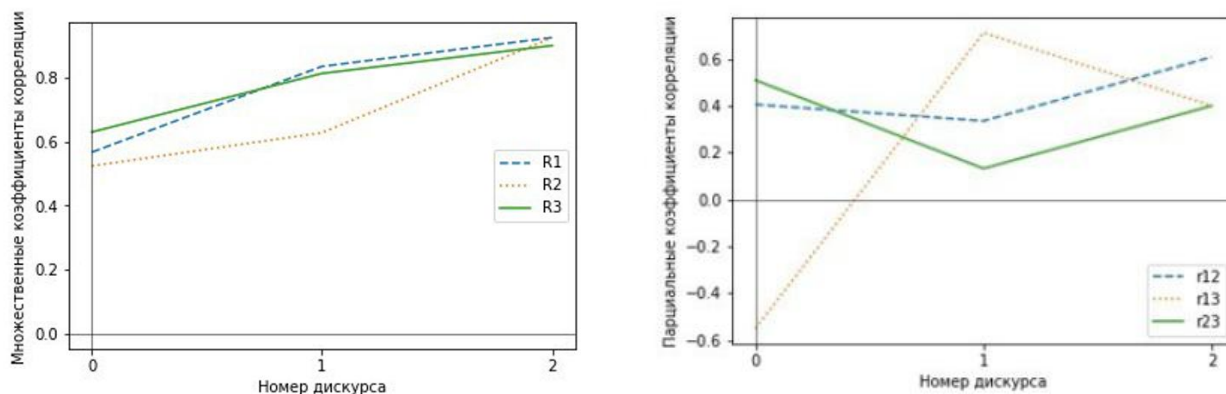


Рисунок 26. Изменение значений коэффициентов корреляции

Предлагаемый подход к оценке степени совпадения точек зрения неоднородных акторов на основе их понимания значимости проблемной ситуации позволяет определить знак тенденции и скорость сходимости (в случае положительной тенденции), что делает возможным оценить качество организации дискурсов, а также временные затраты на достижение приемлемого совпадения взглядов неоднородных акторов.

В шестой главе на основе полученных научных результатов решены практические задачи обеспечения функциональной надежности ИС.

На основе предложенных принципов и подходов к обеспечению функциональной надежности выявлены факторы функциональной надежности локальных ИС при формировании единого информационного пространства компании. Проведен кластерный анализ поступивших запросов в службу поддержки с целью выполнения анализа ошибок, с которыми встречаются пользователи. На основе выделенных кластеров запросов, построена диаграмма Исикавы, построены деревья отказов (*FTA*), способствующие разноаспектному комплексному изучению факторов, выявляя первопричины и формируя представление о проблемной ситуации. Благодаря сочетанию технологий *RCA* и *FTA* достигается системный эффект, что способствует повышению функциональной надежности ИС. Полученные результаты легли в основу типовых инструкций по сопровождению локальных ИС. Результаты расчётов коэффициента готовности показали, что проведенные мероприятия позволили сократить количество отказов более чем в три раза, среднее время восстановления уменьшилось на 60 %, а коэффициент готовности возрос с 89 % до 98,4 %, что подтверждает высокую эффективность принятых мер.

На основе полученных теоретических результатов предложена методика формальной оценки возможности реализации проекта, позволяющая на предпроектной стадии оценить предполагаемую удовлетворенность заказчика результатами проекта, а исполнителей – ходом проекта в зависимости от бюджета и ограничений на длительность проекта с учетом опыта, полученного от ранее реализованных проектов. Основу методики составляет нахождение таких параметров проекта (бюджета и длительности реализации), при которых уровень удовлетворенности заказчика и исполнителя не ниже некоторых заданных значений.

В соответствии с методикой формальной оценки, реализация проекта возможна лишь в условиях сбалансированности параметров проекта заказчика и исполнителя (что выражается значениями α и β) и сопоставимости персонального опыта как заказчика, так и исполнителя, накопленного ими при реализации прежних проектов (что выражается посредством функциональных зависимостей). Применение методики формальной оценки возможности реализации проекта позволяет получить экономический эффект за счет сокращения сроков предпроектной стадии (на 14%) и повышения обоснованности параметров проекта.

Разработана методика и прототип программного обеспечения для анализа моделей проектируемых функциональных компонент ИС по критериям функциональной надежности. В основе методики полученные теоретические результаты, основу которых составляет метод структурного моделирования последствий отказов на основе схем сопряжения. Функционал прототипа направлен на обеспечение анализа отказов, начиная с визуализации взаимосвязей между компонентами ИС и заканчивая исследованием причин возникновения отказов. С целью описания логики работы программы разработаны объектно-ориентированные модели. В качестве CASE-средства проектирования *UML*-диаграмм использовалось инструментальное средство *draw.io*, программа реализована на языке *Python*.

Применение методики и прототипа программы для анализа моделей проектируемых функциональных компонент ИС по критериям функциональной надежности, позволяет построить простую и наглядную модель структуры ИС и избавиться от трудоемкого и затратного по времени процесса ручного построения структурных моделей отказов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате диссертационного исследования разработаны теоретические, методологические и модельные основы обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии. Сделаны следующие выводы и получены результаты:

1. Разработана методология обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии, основанная на интеграции системного, архитектурного, динамического и других общенаучных подходов и принципов. Предложенная методология отличается тем, что она объединяет в себе реактивный и проактивный подходы к обеспечению функциональной надежности ИС на предпроектной стадии. В рамках системного подхода разработаны концептуальные основы обеспечения функциональной надежности, отличающиеся от известных подходов, тем, что с единых позиций позволяют рассмотреть стратегии, реализующие реактивный и проактивный подходы. Впервые сформулированы принципы и подходы к обеспечению функциональной надежности ИС как разновидности сложных систем. В совокупности это позволило сформировать методологическую основу для исследования структуры проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС на предпроектной стадии.

2. На основе положений эвергетики и системной интеграции *V*-модели жизненного цикла и подхода *QFD* (функции развертывания качества), реализованного в виде модели «Дом качества» - *HoQ*, разработаны новые системные модели предпроектной стадии. Разработанный комплекс системных моделей предпроектной стадии отличается тем, что является основой для выработки консолидированного мнения неоднородных акторов относительно внешнего облика ИС, а также позволяет в единой форме представить преобразования дефектов при переходах на разные стадии жизненного цикла. Комплексное использование системных моделей позволяет повысить прозрачность содержания ожидаемых результатов проекта для заинтересованных сторон.

3. Разработаны структурные модели процессов обеспечения функциональной надежности ИС, основанные на системном сочетании архитектурного подхода и анализе структурных свойств, отличаются тем, что пространство проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности, формируется на основе системных архетипов.

Разработана формальная модель ошибок предпроектной стадии и выполнена ее верификация. Предложенной модели поставлен в соответствие архетип «Пределы роста», из чего следует, что существует предел возможностей по предупреждению дефектов. Предлагаемый подход отличается тем, что источники ошибок и дефектов выявляются на предпроектной стадии, в отличие от известных подходов, которые ориентируются на то, что проект начинается с разработки и реализации технического задания.

Разработаны контурные и динамические модели проблемных ситуаций, связанных с обеспечением функциональной надежности ИС на основе системных архетипов, отличаются тем, что системные архетипы представляются совокупностью контурных моделей, весовые характеристики которых определяются математико-статистическими методами, это позволяет перейти от качественного описания ситуаций к математическим моделям, позволяющим получить количественные оценки отдельных ситуаций.

В рамках ресурсного подхода предложена модель формирования интегрального показателя, характеризующего совокупное влияние факторов, как способствующих, так и препятствующих повышению функциональной надежности, отличается тем, что представляет собой системное сочетание модели «Дом качества» и системных архетипов. Это позволяет повысить степень формализации исследований, ориентированных на оценку влияния качества управления проектом на функциональную надежность ИС.

4. Разработаны методы обеспечения функциональной надежности ИС на предпроектной стадии, включающие:

- метод построения многомерных регрессионных зависимостей отличающийся от известных тем, что исходные данные, соответствующие разным компонентам векторов независимой и зависимой переменных, представляются либо в виде результатов измерений, либо в виде разных по форме экспертных оценок. Основу метода составляет преобразование исходных данных, изначально представляемых в разной форме, к виду закона распределения непрерывной случайной величины.

- метод оценки функциональной надежности информационных сервисов с учетом субъективных оценок пользователей, основанный на концепции

профилей. Основу метода составляет преобразование различных по форме исходных данных к единому виду. Данный подход отличается от существующих тем, что позволяет получать метрические оценки надежности информационных сервисов на основе совокупного использования как измерительных данных, так и субъективных оценок пользователей. Это делает возможным обоснованное определение направления повышения функциональной надежности.

– метод структурного моделирования последствий отказов функциональных компонент ИС, отличающийся от известных методов совместным использованием аппарата схем сопряжения и таблиц истинности. Это создает основу для построения структурных моделей, обеспечивающих моделирование отказов в рамках как нисходящего, так и восходящего подходов к исследованию. Метод позволяет провести оценку возможных последствий отказов по различным критериям функциональной надежности для разных схем построения ИС на предпроектной стадии.

5. Предложена статическая модель проекта как многосвязного объекта управления основанная на том, что состояние проекта характеризуется совокупностью прямых и перекрестных связей между входными и выходными параметрами, отличается тем, что характеристики прямых и перекрестных связей определяются на основе исторических данных о ранее реализованных проектах, представленных в виде числовых характеристик, и субъективных оценок лиц, причастных к реализации прежних проектов. Предложенная формальная модель дает возможность повысить обоснованность принятия стратегических решений по организации проекта основными заинтересованными сторонами.

Предложен подход к оцениванию согласованности точек зрения неоднородных акторов на основе их субъективного восприятия значимости проблемных ситуаций, отличается тем, что для основы формализации описания видений неоднородных акторов объединяет в себе системные архетипы и модель «Дом качества» - НоQ. В качестве индикаторов изменения степени согласованности точек зрения выступают парциальное и множественный коэффициенты корреляции. Предложенная схема формирования метрических характеристик степени согласованности мнений неоднородных акторов создает основу для мониторинга хода выработки консолидированного мнения неоднородными акторами о внешнем облике ИС, что сокращает длительность предпроектной стадии.

6. На основе предложенных принципов и подходов к обеспечению функциональной надежности выявлены факторы функциональной надежности ИС при формировании единого информационного пространства компании.

В рамках барьерного подхода к предотвращению организационных дефектов предложена методика формальной оценки возможности реализации проекта, отличается тем, что позволяет на предпроектной стадии оценить предполагаемую удовлетворенность заказчика результатами проекта, а исполнителей – ходом проекта в зависимости от бюджета и ограничений на длительность проекта с учетом опыта, полученного от ранее реализованных проектов. Это позволяет получить экономический эффект за счет сокращения сроков предпроектной стадии и повышения обоснованности параметров проекта.

На основе предложенного метода структурного моделирования последствий отказов на основе аппарата схем сопряжения и таблиц истинности разработана методика и программное обеспечение, отличается тем, что позволяет строить структурные модели в рамках как нисходящего (дерево неисправностей *FTA*, модели причинно-следственных связей *Fishbone*), так и восходящего подходов к исследованию функциональной надежности (дерево событий *ETA*) и избавиться от трудоемкого и затратного по времени процесса ручного построения структурных моделей отказов.

В заключении представлены основные результаты, полученные в ходе исследования, сделаны выводы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.** Информационная поддержка проектирования спецификаций требований пользователя // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18. № 5 (66). – С. 57-61.
2. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.** Субхангулова А. С. Оценивание линейных взаимосвязей параметров технических объектов при отсутствии корреляционной таблицы эмпирических данных // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т.19, № 4 (70). – С. 106-117.
3. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Курунова Р. Р. Выявление противоречий в требованиях к программному продукту на основе исследования не прямых связей между ними // Программная инженерия. – 2015. – № 7. – С. 11-20.
4. Гвоздев В. Е., Ильясов Б. Г., **Бежаева О. Я.**, Курунова Р. Р. Сравнительный анализ проектных решений по комплексу потребительских свойств и технических характеристик объектов // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22. № 10. – С. 764-770.
5. Гвоздев В. Е., Мунасыпов Р. А., **Бежаева О. Я.**, Ахметова Д. Р. Построение модели многосвязного объекта на основе совместного использования данных и экспертных оценок // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9. №3 (33). – С. 361-368.
6. Гвоздев В. Е., Гузаиров М. Б., **Бежаева О. Я.**, Курунова Р. Р., Насырова Р. А. Информационная поддержка проактивного управления функциональной безопасностью компонентов киберфизических систем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. Т. 8. № 2 (29).
7. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Насырова Р. А. Модели возникновения ошибок на предпроектной стадии разработки компонент информационно-вычислительных систем // Онтология проектирования. – 2020. – Т.10. №1 – С. 73-86.
8. Гвоздев В. Е., Гузаиров М. Б., **Бежаева О. Я.**, Давлиева А. С., Галимов Р. Р. Обеспечение функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов в условиях неопределенности среды использования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. Т.8, № 3 (30). –

9. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Ахметова Д. Р., Сафина Г. Р. Формирование параметров модели управления проектом на основе линейаризации функциональных зависимостей // *Онтология проектирования*. – 2020. – Т.10. №4 – С. 527-539.

10. **Бежаева О. Я.** Системные архетипы как методическая основа обеспечения функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов // *International Journal of Open Information Technologies* – 2021. – Т.9. №4. – С. 34-40.

11. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Ахметова Д. Р., Сафина Г. Р. Оценка бюджета проекта по критериям удовлетворённости акторов // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т.11, №3 – С. 382 - 392.

12. Гвоздев В. Е., Гузаиров М. Б., **Бежаева О. Я.** Анализ влияния качества управления проектом на состояние функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов на основе системного архетипа «предел роста» // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2021. Т.9, № 3. – С.1-15.

13. Гвоздев В. Е., Гузаиров М. Б., Васильев В. И., **Бежаева О. Я.** Поддержка управления функциональной безопасностью аппаратно-программных комплексов на основе системных архетипов // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2022. Т.10, № 2. – С. 1-14.

14. **Бежаева О. Я.** Принципы и подходы к обеспечению функциональной безопасности компонентов вычислительно-коммуникационных систем // *International Journal of Open Information Technologies* – 2022. – Т.10. №3. – С. 23-29.

15. Гвоздев В.Е., **Бежаева О.Я.**, Сафина Г.Р. Многоаспектное моделирование ситуаций в задачах обеспечения функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов // *Онтология проектирования*. – 2023. – Т.13, №1 (47) – С. 125 - 138.

16. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Галимов Р. Р., Тимофеева К. Ю. Оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии // *Онтология проектирования*. – 2025. – Т.15, №1 (55) – С. 130 - 141.

Монографии

17. Гузаиров М. Б., Гвоздев В. Е., Ильясов Б. Г., **Бежаева О. Я.** Элементы системной инженерии: методологические основы разработки программных систем на основе V-модели жизненного цикла. – М: Машиностроение, 2013. – 180 с.

18. Криони Н. К., Гвоздев В. Е., Ильясов Б. Г., **Бежаева О. Я.**, Блинова Д. В. Элементы системной инженерии. Технологии формирования требований к аппаратно-программным комплексам на основе экспертно-статистических методов. – М.: Машиностроение, 2017. – 295 с.

19. Черняховская Л. Р., Васильев В. И., Гвоздев В. Е., Никулина Н. О., Малахова А. И., Вульфин А. М., **Бежаева О. Я.** Методы и модели поддержки принятия решений при управлении инновационными проектами в производственно-экономических системах / под общ. ред. д.т.н., проф. Черняховской Л. Р. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – 230 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

20. Св-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ №2020667386. Программа для формирования сбалансированной системы характеристик проекта / Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Ахметова Д. Р., Сафина Г. Р. // Роспатент. М.: Зарег. в реестре программ для ЭВМ 16.12.2020.

21. Св-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ №2021616053. Программа для оценки критического пути по показателю неопределенности / Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Ахметова Д. Р., Седлецкий К. В. // Роспатент. М.: Зарег. в реестре программ для ЭВМ 06.04.2021.

22. Св-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ №2023667695. Идентификация проблемных ситуаций при управлении проектами / **Бежаева О. Я.**, Хуснутдинов Х. В. // Роспатент. М.: Зарег. в реестре программ для ЭВМ 10.08.2023 г.

23. Св-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ №2025668826. Программа для анализа моделей проектируемых программных компонентов по критериям функциональной надежности / **Бежаева О. Я.**, Гвоздев В. Е., Газизов А. И. // Роспатент. М.: Зарег. в реестре программ для ЭВМ 18.07.2025 г.

24. Св-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ №2025680057. Программа для расчета степени согласованности неоднородных акторов на основе ранговых оценок проблемной ситуации / **Бежаева О. Я.**, Гвоздев В. Е., Тимофеева К.Ю. // Роспатент. М.: Зарег. в реестре программ для ЭВМ 01.08.2025 г.

В изданиях, входящих в системы цитирования SCOPUS и WoS

25. Gvozdev V. E., Chernyakhovskaya L. R., **Bezhaeva O. Ya.**, Nasyrova R. A. Reliability analysis of information systems based on the concept of service profiles // Proceedings of the 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems, CSCMP (Samara, Russia, September 2019). – 2019, Publisher: IEEE. P. 1-6.

26. Gvozdev V. E., Guzairov M. B., **Bezhaeva O. Ya.**, Davlieva A. S., Galimov R. R. Ensuring the Functional Safety of the Distributed Dynamic Systems Components in the Conditions of Uncertainty of the Environment Use // Proceedings of the International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS. - 2020, Publisher: IEEE. – P. 232-237.

27. Gvozdev V. E., **Bezhaeva O. Ya.**, Blinova D. V., Akhmetova D. R. The Model of the Innovative Project as the Multivariable Control Object // Advances in Intelligent Systems Research. – 2020. – Vol. 174. – P. 278-282.

28. Gvozdev V. E., **Bezhaeva O. Ya.**, Akhmetova D. R., Safina G. R. Formation of Balanced System of Program Project Characteristics // Advances in Intelligent Systems Research. – 2020. – Vol. 174. – P. 302-306.

29. Gvozdev V. E., **Bezhaeva O. Ya.** The studies of strategies for ensuring the functional safety of hardware and software complexes based on system archetypes and architecture models // Proceedings of the International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS. - 2021, Publisher: IEEE. – P. 171-175.

30. Gvozdev V. E., **Bezhaeva O. Ya.**, Galimov R. R. Construction of Signal Transmission Structures in Information Systems Based on Conjunction Schemes // Proceedings of the 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon. - 2023, Publisher: IEEE. – P. 1-5.

Публикации в других изданиях

31. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.** Принципы и подходы к проектированию требований к программным продуктам и программным проектам // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: сборник трудов XVI международной конференции. – Самара: ИПУСС РАН, 2014. – С. 196-203.

32. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Субхангулова А. С. Информационная поддержка планирования ресурсов для устранения дефектов на стадии реализации компонентов аппаратно-программных комплексов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: сборник трудов XVIII международной конференции. – Самара: ИПУСС РАН, 2016. – С. 271-276.

33. Gvozdev V. E., **Bezhaeva O. Ya.**, Akhmetova D. R., Levkov A. A. The Method for Linear Regression Models Constructing Based on the Sharing of Measured Data and Expert Assessments // Atlantis Highlights in Computer Sciences. 2019. Vol. 3. – P. 89-93.

34. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Насырова Р. А. Анализ надежности информационных систем на основе концепции профилей сервисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной конференции. – Самара, 2019. – С. 21-25.

35. Гвоздев В. Е., Черняховская Л. Р., Никулина Н. О., **Бежаева О. Я.** Информационная поддержка формирования параметров программных проектов // Информационные технологии в управлении: материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2020 г. – С. 112-115.

36. Гвоздев В. Е., Юсупова Н. И., **Бежаева О. Я.** Методические основы управления функциональной безопасностью информационно-вычислительных компонент на основе концепции «барьерное мышление» // Информационные системы и технологии. Достижения и перспективы: труды международной конференции. – Азербайджан, Сумгаит, 2020г. – Том 5. – С. 331-333.

37. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Григорьев Е. С. Сравнительный анализ подходов к обеспечению функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы конференции. – Воронеж, 2021. – Ч.1. – С. 23-31.

38. **Бежаева О. Я.**, Ракипова А. С., Тимофеева К. Ю. Количественные оценки согласованности точек зрения акторов // Молодежный Вестник УГАТУ. – 2024. – №2 (31) – С. 16 - 19.

39. Гвоздев В. Е., **Бежаева О. Я.**, Галимов Р. Р., Тимофеева К. Ю. Мониторинг согласованности видений неоднородными акторами факторов проблемных ситуаций на основе статистической обработки экспертной информации // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (Памяти проф. Н.И. Юсуповой) ITIDS'2024: Труды X Международной научной конференции. Уфа, 2024г. – Том 1. – С. 279-283.

40. **Бежаева О. Я.**, Гвоздев В. Е., Приходько В.Е., Ракипов Р.Р., Ракипова А.С., Тепляшин П.Н. Анализ структурной надежности многослойных взаимодействующих сетей передачи данных // Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники: Сборник научных трудов научно-парктической конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 41-49.

Соискатель

О.Я. Бежаева