

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Трундаев Иван Вячеславович

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ
СОЗДАНИЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО
ФИНАНСИРОВАНИЯ РАБОТ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель Гисин Владимир Борисович,
кандидат физико-математических наук, профессор

Москва – 2026

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Особенности создания радиолокационных станций мониторинга космического пространства и анализ существующих методов управления разработкой в условиях неопределённости	13
1.1 Анализ особенностей создания радиолокационных станций.....	13
1.2 Анализ требований к информационному обеспечению процесса управления созданием радиолокационной станции	18
1.3 Анализ существующих методов управления	19
1.4 Направления совершенствования управления созданием РЛС.....	23
1.5 Постановка научной задачи исследования	27
1.6 Выводы об особенностях создания РЛС МКП.....	31
Глава 2 Математическая модель разработки радиолокационной станции	34
2.1 Назначение модели разработки РЛС	34
2.2 Формализация показателей процесса разработки РЛС.....	38
2.3 Комплексный риск разработки РЛС	43
2.4 Формализация процесса разработки	45
2.5 Описание модели	53
2.6 Структурно-логическая схема модели разработки РЛС	58
2.7 Влияние стохастических возмущений на уровень готовности	60
Глава 3 Методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ	64
3.1 Общее описание методики	64
3.2 Построение динамической траектории разработки РЛС	67
3.3 Оценка комплексного риска разработки РЛС	70
3.4 Построение области допустимого риска в фазовом пространстве	74
3.5 Условия дополнительного финансирования: критерии необходимости и целесообразности	82

3.6	Принятие решения о финансировании или пересмотре разработки компонентов РЛС.....	85
Глава 4	Исследование эффективности методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ и рекомендации по ее практическому применению.....	89
4.1	Программно-аппаратный комплекс управления созданием РЛС	89
4.2	Описание вычислительного эксперимента по оценке эффективности методики адаптивного финансирования разработки.....	92
4.3	Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий А	98
4.4	Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий Б.....	108
4.5	Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий Б.....	120
4.6	Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий Б.....	126
	Заключение	133
	Список сокращений и условных обозначений	135
	Список литературы	136

Введение

Актуальность темы исследования. Разработка современных радиолокационных станций (далее – РЛС) мониторинга космического пространства (далее – МКП) характеризуется длительными сроками, большим объемом задействованных ресурсов, высокотехнологичными модулями, проектирование и изготовление которых требует тесной взаимосвязи научного и промышленного секторов.

Длительность проекта и сложность научно-промышленной кооперации порождают стадии жизненного цикла (далее – ЖЦ): проектирование, изготовление и испытания. Каждый этап имеет свои особенности и проблемы, учет которых необходим при планировании разработки. Характерно, что начальное планирование долгосрочных проектов осуществляется с дефицитом данных в условиях фундаментальной неопределенности будущего. Это осложняет управление разработкой на основе прогнозирования событий, которые на момент проектирования вообще не могли существовать. Тогда применение вероятностных методов недостаточно обосновано для риск-анализа.

В таком случае для расчета риска целесообразно использовать мягкие методы, комбинирующие формальный математический аппарат с экспертными оценками. Однако задача управления ходом разработки РЛС остается недостаточно решенной. Существующие и широко распространенные методы управления техническими системами в обозначенных условиях не позволяют учитывать изменение информации на различных стадиях ЖЦ процесса создания РЛС. Такая динамика делает риск нестатическим показателем, и ее влиянием на управление нельзя пренебрегать.

Создание модели разработки РЛС и методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, обеспечивающие

оперативную оценку комплексного риска срыва сроков разработки для обоснования финансовых решений, направленных на успешное завершение разработки в условиях ограниченности ресурсов, дефицита данных и фундаментальной неопределенности является актуальной задачей. Предлагаемая в работе методика основана на новых действиях. Осуществляется построение директивной (плановой) и фактических траекторий проекта, отражающих изменение технической готовности и бюджета, это позволяет адекватно оценивать комплексный показатель риска. На его основе осуществляется построение области допустимых рисков с изменяемыми границами в зависимости от текущего значения риска и его динамики. Обоснование необходимости финансирования заключается в проверке нахождения фактической траектории в области допустимых рисков, а обоснование целесообразности заключается в обозначении порогового значения предельной эффективности инвестиций, что должно предотвратить нерациональное вливание средств в проект. Дальнейший расчет моментов финансирования и его объемов обеспечивает снижение рисков, что возвращает траекторию разработки в область допустимых рисков и позволяет завершить проект с целевыми показателями в срок.

Степень разработанности темы исследования. Модели разработки РЛС ДО и иных крупных долгосрочных проектов, методы управления разработкой комплексов РЛС и управления сложными техническими системами, их практические и теоретические аспекты были отображены в основных работах отечественных исследователей А.Л. Минца, М.М. Лобанова, Ю.Б. Кобзарева, П.К. Ощепкова. Их работы по праву считаются основополагающими для разработки РЛС ДО. Следующее поколение исследователей разрабатывает новые методы управления ходом разработки РЛС ДО: системное проектирование, организация ЖЦ разработки, методы оценки эффективности, управление рисками при создании РЛС ДО. Актуальные исследования освещаются в работах С.Ф. Боева, А.Ю. Шокина,

А.В. Тимошенко, Г.Н. Мальцева, А.А. Рахманова, А.П. Линкевичиуса, А.С. Логовского, С.В. Игнатьева, В.И. Ширяева, А. Ю. Перлова, А.М. Казанцева, В. А. Панкратова, Р.С. Шафира, И.С. Ашуркова, А.А. Брагиной, А.М. Ленихина, Н.А. Махутова, Н.П. Будко, О.В. Крюкова, Д.В. Левина, Н.А. Лешко, С.И. Макаренко, А.А. Мурашова.

Зарубежные исследования в области описания и организации процесса разработки крупных комплексов РЛС представлены работами M.I. Skolnik, J.M. Headrick, A. Farina, T. Thayaparan, B. Nuss, V. Bazin, J.P. Molinie, P. Dorey, M. Lesturgie, Y. Lu, H. Sun.

Данные подходы по отдельности содержат определенные недостатки. Возможные дополнения и направления совершенствования, выражающиеся как в гибриде известных методов и в новых действиях при управлении, являются ключевыми для совершенствования теории об управлении разработкой крупных проектов в целом.

Цель и задачи исследования. Цель настоящего исследования заключается в снижении рисков при создании РЛС мониторинга космического пространства для успешного завершения разработки в соответствии с плановыми установками за счет внедрения адаптивной модели финансирования, основанной на оперативной оценке комплексного риска в условиях неопределенности.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- 1) определение особенностей создания РЛС МКП, выявление недостатков существующих методов управления ходом разработки РЛС и выявление направлений совершенствования управления разработкой радиолокационных комплексов;
- 2) разработка математической модели создания РЛС МКП, позволяющей строить траектории процесса для оценки динамики технической готовности и бюджета, и обеспечивающей расчёт комплексного показателя

риска с учётом неопределённости исходных данных;

3) разработка методики управления созданием РЛС МКП на основе адаптивного финансирования, позволяющей формализовать оперативную корректировку денежных поступлений по результатам оценки комплексного риска;

4) сравнительный анализ разработанной методики управления с известными и формирование практических рекомендаций по управлению разработкой на примере комплекса барьерно-сопровождающей РЛС (далее – РЛС-БС);

Объектом исследования. Объектом исследования выступает процесс создания радиолокационной станции в условиях неопределенности.

Предмет исследования – математические модели, методы и алгоритмы оценки рисков и адаптивного финансирования, обеспечивающие управление процессом разработки РЛС для достижения требуемых показателей в установленные сроки.

Область исследования диссертации соответствует п. 4. «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели»; п. 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» Паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Информационная база. Информационную базу исследования составляют открытые данные от акционерного общества «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца» (далее – НПОДАР) по компонентам РЛС-БС 1 очереди из пояснительной записки к составной части опытно-конструкторской работы «АСПОС ОКП-2025 (АП МП)-НИИДАР РЛС-БС» (автоматизированная

система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве, шифр «Млечный путь», научно-исследовательский институт дальней радиолокации), документ «РНКП.464421.002ПЗ7» [5].

Научная новизна исследования. Научная новизна выносимых на защиту положений заключается в том, что:

1) Построена математическая модель разработки РЛС, отличающаяся от известных, предложенных Боевым С.Ф., Линкевичусом А.П., Логовским А.С., Мальцевым Г.Н., Рахмановым А.А., Тимошенко А.В. [10], Арутюняном А.А., Конопелькиным М.Ю., Щирым А.О. [38], Литвиновым С.В., Глинкиным И.А., Власовым Ю.М. [41], Ширяевым В.И., Брагиной А.А. [61]:

– процесс разработки описан в виде динамических траекторий, формируемых на основе дифференциальных уравнений с учетом неопределенности данных об изменении готовности компонентов РЛС и возможности адаптивного финансирования их разработки;

– параметры модели (коэффициент адаптации, оптимальная скорость разработки) определяются для различных этапов ЖЦ на основе технологических и ресурсных характеристик проекта.

2) Разработана методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, отличающаяся от известных, предложенных Ленихиным А.М., Махутовым Н.А., Шокиным Ю.И., Юрченко А.В. [40], Боевым С.Ф., Рахмановым А.А., Линкевичусом А.П., Якубовским С.В., Володиным П.В. [8; 10] и [25]:

– процесс разработки представлен в виде динамических траекторий, формируемых на основе численного решения системы дифференциальных уравнений, при этом стохастические возмущения моделируются с использованием численных методов генерации случайных процессов;

– введен динамический комплексный показатель риска в процесс разработки РЛС;

- строится область допустимого риска, границы которой определяется на основании проектной (конструкторской) документации и директивно утверждённых допусков ключевых параметров проекта (ГОСТ, акты и требования ТЗ), а также с учетом динамики показателя риска;
- управляющие воздействия (моменты и объем финансирования) для поддержания траектории в допустимой области риска определяются с учетом текущей технической готовности с использованием аппарата нечеткой логики.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в том, что модель разработки позволяет строить фазовые и кинетические портреты состояния проекта РЛС-БС МКП с учетом возмущающих факторов и управляющих воздействий, а методика адаптивного финансирования обеспечивает расчет оценки комплексного риска в условиях дефицита данных и фундаментальной неопределённости.

Практическая значимость работы подтверждается готовностью модели разработки РЛС и методики адаптивного финансирования к внедрению в процессы управления проектами РЛС ДО предприятиями оборонно-промышленного комплекса. Модель создания РЛС позволяет строить директивную траекторию разработки РЛС МКП на всех этапах ЖЦ и задает основу для вычисления рисков создания РЛС. Методика позволяет оценивать риски разработки РЛС при дефиците данных на основе: мягкой оценки отклонений ключевых показателей от плановых значений, правил определения границ области допустимых рисков, критериев необходимости и целесообразности дополнительного финансирования.

Методология и методы исследования основаны на исследованиях отечественных и зарубежных учёных в области управления созданием сложных технических систем, математического моделирования динамических процессов, теории рисков и управления в условиях фундаментальной неопределённости. Исследование основано на подходе, который объединяет

методы математического моделирования, мягких вычислений и имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту. В соответствии с поставленными задачами, положения, выносимые на защиту, включают в себя следующее:

Разработана математическая модель создания РЛС, которая позволяет описывать динамику ключевых показателей проекта во времени и демонстрировать их изменение посредством фазовых и кинетических портретов, учитывать влияние возмущающих факторов и управляющих воздействий, изменение параметров разработки в зависимости от текущего этапа ЖЦ разработки (С. 35-62).

Разработана методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, которая отличается от известных тем, что позволяет строить директивную (плановую) и фактическую траектории разработки, вычислять комплексный показатель риска (оценивающий состояние разработки в условиях фундаментальной неопределенности), и определять необходимость, целесообразность и объем соответствующих управляющих воздействий (С. 63-87).

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования. Достоверность теоретических и практических результатов подтверждена численными экспериментами, докладами на научных конференциях, соответствующих направлению диссертационного исследования.

Результаты исследования представлены: на X Международной научно-практической конференции «Современная математика и концепции инновационного математического образования» (Москва, Финансовый университет, 21 июня 2023 г.); на XI Международной научно-практической конференции «Современная математика и концепции инновационного математического образования» (Москва, Финансовый университет, 19 июня 2024 г.); IV Международной

научно-практической конференции «Социально-экономическая траектория развития России: категорический императив бытия во времени и пространстве» (г. Тверь, Тверской государственный университет, 28-29 ноября 2024 г.); на XXXII Международной научной конференции «Математика. Компьютер. Образование» (г. Пущино, Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук, 27-31 января 2025 г.); на XLIV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем» (г. Серпухов, Военная академия РВСН имени Петра Великого, 26-27 июня 2025 г.); на XXVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития и применения средств ПВО с учетом опыта специальной военной операции. Средства ПВО России и других стран мира, их сравнительный анализ» (г. Ярославль, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени маршала Советского Союза Л.А. Говорова, 10 октября 2025 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития радиолокационных и информационных систем в интересах обеспечения Воздушно-космических сил Российской Федерации» (Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники, Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца, 20 ноября 2025 г.).

Результаты использованы Московским филиалом ООО «НРТК КАПС» в ходе разработки перспективного дистанционно управляемого наземного робототехнического комплекса. Результаты диссертационного исследования в рамках определения области допустимых рисков и управления позволили сформировать предложения по контролю разработки при массовом производстве компонентов НРТК.

Результаты использованы в АО «НПОДАР имени академика А.Л. Минца» при формировании рекомендаций по реализации в аванпроекте

СЧ ОКР «АСПОС ОКП-2025 (АП МП)-НИИДАР РЛС-БС» сложного и крупного комплекса РЛС-БС 1 очереди. Модель разработки РЛС и методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ по априорным данным из конструкторской документации сформирована директивная траектория, что позволяет формализовать дальнейшие рекомендации по контролю ходом разработки.

Материалы диссертации используются Кафедрой математики и анализа данных Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета в преподавании учебных дисциплин «Цифровая математика на языке R и Excel» и «Математика» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 38.03.01 «Экономика».

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах общим объемом 6,75 п.л. (авторский объем – 5,51 п.л.), в том числе 3 работы общим объемом 3,06 п.л. (авторский объем – 2,41 п.л.) опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России, а также 2 работы общим объемом 2,81 п.л. (авторский объем – 2,5 п.л.) опубликованы в изданиях, входящих в цитатно-аналитическую базу RSCI. Все публикации по теме диссертации.

Структура и объем диссертации определяется поставленной целью, задачами и логикой исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 79 наименований. Текст диссертации изложен на 146 страницах, содержит 3 таблицы, 27 рисунков и 80 формул.

Глава 1

Особенности создания радиолокационных станций мониторинга космического пространства и анализ существующих методов управления разработкой в условиях неопределённости

1.1 Анализ особенностей создания радиолокационных станций

Современные радиолокационные станции являются сложными и высокотехнологичными системами [9; 25]. Зачастую такие системы являются крупными комплексами на основе модульного построения [8]. Компонентами РЛС дальнего обнаружения (далее – ДО) могут выступать приемно-передающие комплексы (включающие в себя антенные элементы, инженерные комплексы частотно-зависимой части, радиопрозрачные укрытия, капитальные строения), комплексы обработки и управления, программное обеспечение и комплекты запасных частей и принадлежностей. Компонентная сборка предполагает завершенность отдельных модулей РЛС до момента доставки в точку размещения (перед последующим монтажом). Примером РЛС ДО является РЛС-БС для обеспечения безопасности космической деятельности.

Частный случай разработки комплексов РЛС-БС – система информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве (далее – ОКП) «Млечный путь» (на текущий момент находящаяся на этапе аванпроекта [5]). Данный комплекс создается с целью поиска, обнаружения и сопровождения в заданной зоне действия техногенных космических объектов (далее – ТКО). Задачами РЛС МКП в системе «Млечный путь» являются: обнаружение и сопровождение ТКО в барьерной зоне обзора (далее – БЗО), обнаружение и определение активных помех, распределение ресурсов для осуществления первоочередной задачи, информационная кооперация с другими ключевыми

объектами инфраструктуры, формирование и выдача сообщений, поддержка базы данных о ТКО. Подробные тактико-технические характеристики (далее – ТТХ) изложены в соответствующей документации [5]. Функциональными аналогами являются РЛС военного назначения: РЛС «Дарьял», РЛС «Воронеж-ДМ-2», РЛС «Haystack Auxiliary Radar», система радаров «Space Fence» (зарубежный опыт создания РЛС МКП описан в [75]).

Создание РЛС мониторинга космического пространства непрерывной эксплуатации характеризуется длительными сроками. Например, создание комплексов РЛС-БС 1 и 2 очередей системы «Млечный путь» планируется с 2026 года по 2036 год. Разработка такой длительности проходит этапами.

1) Первыми этапами жизненного цикла разработки РЛС ДО являются создание эскизного проекта (с рекогносцировкой мест размещения) и разработка рабочей конструкторской документации и программной документации.

2) Далее следует этап изготовления РЛС. Осуществляется закупка материалов, сырья и иных комплектующих, осуществляется последующее изготовление, доставка в место назначения, монтаж, настройка и сдача комплекса. Начинается последующая комплексная стыковка и раскладка комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей одиночной (далее – ЗИП-О) РЛС.

3) На завершающем этапе происходит проведение предварительных и государственных испытаний. На данном этапе возможна корректировка рабочей конструкторской документации. Осуществляется ввод РЛС в эксплуатацию.

Особенностью является то, что реализация любого этапа ЖЦ разработки РЛС МКП осуществляется в условиях фундаментальной неопределённости будущего (под которой будем понимать отсутствие полной и точной познаваемой информации в некоторый момент времени, в частности, о значениях переменных, о количественной или качественной мере параметров,

о функционировании или структуре процесса или среды) [9]. Это означает, что в процессе разработки могут возникать такие события, которые в момент начала проектирования вообще не могли существовать. Вероятностное понимание риска не в полной мере согласуется с данным типом неопределенности, что делает применение аппарата теории вероятностей недостаточно обоснованным.

В данной работе определим риск как [2; 4] «следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей» (отклонение от ожидаемого результата). Риск часто, но не всегда [3; 4], представляют в виде последствий возможного события и соответствующей вероятности.

Неопределённость связана с обращением внутри экономики «долгоживущих» активов, последствия использования которых могут проявляться спустя долгое время (космическая инфраструктура и орбитальные группировки, ядерные объекты, крупная гидротехнические и энергетические сооружения, оборонные научно-промышленные комплексы, горнодобывающие и металлургические компании, цифровые активы). РЛС – это тоже долгоживущий актив, поскольку её жизненный цикл (от разработки до утилизации) занимает многие годы, а риски и последствия использования могут быть отсроченными. Учет неопределённости в описании разработки крупных технических объектов является неотделимым этапом при построении различных систем характеризующих взаимодействие субъектов в финансах и экономике.

Разработка РЛС становится нестабильной или хрупкой в условиях фундаментальной неопределённости (например, из-за уменьшения ликвидности балансов взаимодействующих сторон), что описывается теорией финансовой нестабильности [16]. Одной из превентивных мер для снижения рисков при создании РЛС с требуемыми характеристиками в заданные сроки и в пределах финансирования может стать поддержка поступлений по проекту [16]. Отсутствие поддержки крупных проектов, имеющих критическое

оборонно-технологическое значение (как РЛС), может вызвать каскадный эффект в связанных отраслях промышленности. Должна проводиться стимулирующая политика крупных и высокорисковых РЛС (в том числе со стороны государства [15]).

Систематическая оценка рисков является основным средством борьбы с негативными последствиями фундаментальной неопределённости в разработке РЛС. Управленческие решения принимаются на основе количественных оценок комплексного риска. Эти оценки должны быть точными, они должны адекватно отображать тенденции в разработке, насколько это возможно в условиях дефицита данных. Решения по снижению рисков реализуются через дополнительное финансирование. Это финансирование должно быть своевременным и обоснованным. Оно востребовано на критических этапах. Такой подход позволяет фиксировать момент возникновения отклонений и компенсировать их.

Обоснование условий и критериев управления дополнительным финансированием крупных и критически важных проектов, таких как система «Млечный путь», является стратегически важной научной задачей. Её решение особенно необходимо для начальных и средних этапов ЖЦ разработки РЛС МКП, когда возмущающие факторы допустимо нейтрализовать. В ином случае неопределённость хода разработки, являющаяся следствием возмущающих факторов, уводит процесс разработки от целевых значений. Несвоевременный мониторинг ключевых показателей и запаздывающее управление проектом приводят либо к срыву сроков, либо к нерациональному расходованию средств. Анализ процесса разработки, выявление негативных факторов и определение условий финансирования повышает эффективность использования средств и стабильность головного предприятия, отвечающего за разработку комплекса МКП.

Эффективность создания РЛС МКП прямо связана с экономической эффективностью использования изначально заложенных в стоимость

государственного контракта и дополнительных финансовых ресурсов, особенно в условиях жёстких тактико-технических требований и ограниченного бюджета [48]. Создание РЛС ДО требует специальных методов оценки рисков и управления ходом разработки [21; 38; 41].

При разработке масштабных РЛС возникают экономические проблемы (например, рост стоимости материалов и комплектующих) и технические проблемы (например, низкая технологическая готовность производства или сбой в испытаниях). Без правильного решения этих проблем невозможно адекватно учесть влияние неопределённости и оценить риски. Ошибки при оценке состояния разработки не позволяют своевременно влиять на ход создания РЛС. Основные возмущающие факторы, которые влияют на ключевые показатели разработки, включают: инфляцию, изменение ключевой ставки, нарушение логистических цепочек, внешнее экономическое давление, а также эндогенные факторы в экономике.

Таким образом, основными особенностями создания РЛС МКП являются: длительный жизненный цикл и фундаментальная неопределённость будущего, относящая РЛС к классу «долгоживущих активов»; высокая хрупкость разработки в условиях финансовой нестабильности, требующая государственной поддержки; а также запаздывающий характер традиционного управления, не позволяющий своевременно компенсировать отклонения.

Вышеперечисленные особенности (в том числе выявленные проблемы) обуславливают создание математического аппарата, методики управления и программного комплекса для решения задач такого класса. Разрабатываемые в диссертации средства за счёт управления финансовыми потоками должны обеспечивать достижение целевых ТТХ при разработке РЛС МКП в условиях фундаментальной неопределённости.

1.2 Анализ требований к информационному обеспечению процесса управления созданием радиолокационной станции

Выявленные особенности создания РЛС МКП обуславливают необходимость к информационному обеспечению процесса разработки РЛС. В традиционных методах сопровождения необходима своевременная информация о ходе работ. Однако требуемые данные зачастую разрозненны и хранятся в разных базах данных, а часть показателей до сих пор документируется на бумажных носителях. Административные процедуры на крупных предприятиях не всегда позволяют оперативно корректировать ход разработки. Перечисленные особенности затрудняют оперативный контроль [8; 25].

На первых этапах критически важно получать предиктивную информацию для прогнозирования всплесков возмущающих факторов и отхода ключевых параметров от целевых значений. В условиях сильной неопределенности использование стандартных эконометрических методов усложняется. На этапе проектирования отсутствует достаточный объем статистики для уникальных проектов. Использование статистики схожих функциональных систем не является обоснованным решением проблемы. На этапе изготовления часто наблюдается гетероскедастичность (риски не являются статической величиной [40]), а не выполнение предпосылок делает некорректным применение стандартных статистических подходов. Следовательно, для управления разработкой РЛС в условиях фундаментальной неопределённости необходим комплексный показатель риска. Этот показатель должен объединять отклонения по технической готовности, календарному графику и бюджету, а также учитывать динамику этих отклонений. В отличие от стандартных методов, комплексный риск должен оценивать состояние проекта даже при отсутствии репрезентативной статистики и при нестационарности возмущений.

Альтернативой является рассмотрение текущего состояния проекта относительно планового с косвенным учетом динамики всего проекта. Система контроля должна отслеживать готовность проекта, его бюджет и сроки в реальном времени, что составляет основу для новых гибких методик управления [56]. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений для ситуационных центров [35] могут служить инструментом такой системы контроля.

Специфика информационного обеспечения создания РЛС задаёт требования к математической модели, методике управления и программному комплексу. Предлагаемый в диссертации инструментарий должен учитывать ключевые показатели разработки РЛС МКП (готовность, бюджет, сроки), неопределённость среды, обеспечивать объективную оценку, наглядное отображение состояния разработки и своевременное управление финансированием с заданными ограничениями.

1.3 Анализ существующих методов управления

Проведем анализ существующих методов управления. Как отмечается в [25], «При разработке всех поколений РЛС ДО сложилась одноуровневая структура среды проектирования с применением традиционной линейной схемы, в которой процесс проектирования реализуется в виде последовательности стадий и этапов, завершающихся принятием проектного решения на уровне Генерального конструктора». Преимуществом данного подхода является четкая вертикаль ответственности. В условиях хаотичности среды это действенный способ. Однако этот метод управления перегружает информацией руководителя, что снижает эффективность принимаемых решений. При таком управлении наблюдается зависимость успешности проекта от навыков одного специалиста. Низкий уровень автоматизации ограничивает возможность анализа альтернативных решений.

В двухуровневых системах первый уровень определяет единую платформу проектирования как системную модель. Второй уровень включает в себя автоматизированную систему управления. Существующие системы автоматизированного проектирования (далее – САПР) демонстрируют возможность оптимизации показателей разработки РЛС [38; 41]. Проблема получения доступа ко всему объему текущей информации ограничивает применение таких систем.

Работа с изменением во времени ограниченной информации и знаний в сложных и крупных технических системах рассмотрена в работе Ю.И. Шокина [40]. В работе проведено исследование применимости цифровых двойников технических систем. Показана возможность построения алгоритмов оценивания состояния крупных проектов в условиях изменения объема данных и в условиях динамической неопределенности. Для разработки РЛС ДО это означает, что на стадиях концептуального и эскизного проектирования исходные данные крайне ограничены, недостоверны и основаны на экспертных оценках, что делает любые количественные прогнозы (стоимости, сроков, характеристик) крайне ненадежными. Энтропия процесса разработки меняется со временем (вопросы оценки производственных рисков в процессе создания долгосрочных проектов и соответствующие методики освещены в [28; 71]). На старте, когда неопределенность максимальна, управленческие решения являются наиболее критичными и при этом наименее обоснованными. В [40] описано применение цифровых двойников в сложных и разнородных структурах с целью систематического и эффективного управления рисками. Однако рассмотрение всевозможных сценариев аварий для точного прогноза состояния технической системы требует чрезмерно большого объема информации (что верно для целого схожего класса прогнозируемых моделей). А создание цифровых двойников зачастую требует крупных денежных трат. Возникновение ошибки в таких системах, ее поиск и последующее исправление сопровождается дополнительными финансовыми

издержками, высокими трудозатратами, ростом календарных рисков и каскадным роением проблем на сопутствующие подсистемы. Некоторые модели в [9; 10; 20] основаны на том, что будущее состояние зависит только от настоящего. В частности, событийные модели оценки рисков при создании РЛС, рассмотренные в [22], также не учитывают накопленной истории отклонений, что снижает их прогностическую ценность в условиях фундаментальной неопределённости. Однако для долгосрочных проектов история изменений и принятых решений может оказывать критическое влияние, что ограничивает применимость данного подхода.

При долгосрочной разработке, как отмечает академик В. Л. Макаров, проблемы возникают в том числе из-за необходимости кооперации научных и производственных мощностей [44]. Это особенно проявляется на этапах ЖЦ разработки крупных комплексов РЛС. На первом этапе при создании эскиза проекта и разработке конструкторской и программной документации важным компонентом является научная составляющая. На этапе изготовления еще больше проявляется интеграция научного и промышленного секторов. Отсутствие опыта разработки новых систем или контрагентов, готовых взять заказ на производство новых модулей, нехватка производственных линий под новые компоненты или квалифицированных кадров требуют сложной и всеобъемлющей кооперации науки и промышленности. Для разработки РЛС МКП это означает, что нарушение кооперации этих секторов на одном из этапов повлечет за собой нарушение и отставание по срокам на остальных этапах.

Методы системного анализа [36] зачастую пренебрегают прикладной значимостью и обладают определенным уровнем абстракции. В сложных инженерных проектах интеграция научной и производственной работ решается через жесткое управление, технический контроль и живую коммуникацию конструкторов, разработчиков и технологов. Хотя системный взгляд важен и нужен в совокупности с другими методами, попытка

управления ходом крупной разработки в интересах государства только посредством абстрактных классификаций и зачастую рыночно-центричных моделей приведет к иллюзии контроля процесса. Реализация крупных и высокотехнологичных проектов военно-промышленного комплекса (далее – ВПК) требует непосредственного участия государства (особенно при дорогом кредите), выражающегося в финансовой поддержке (или в иных преференциях) и в контроле разработки.

В то же время разработаны методики управления созданием сложных технических систем, учитывающие как технические, так и финансовые аспекты, в том числе с привлечением аппарата нечёткой логики и многокритериальной оптимизации [33; 60].

Частные инвесторы обычно не охотно инвестируют в уникальные высокорисковые научные проекты, подобные созданию РЛС МКП [15; 23; 24]. Ядерные технологии, космическая инфраструктура, интернет, Global Position System, компоненты смартфонов - все в том или ином виде сделано при поддержке государств. Крупные проекты и производства нигде в мире не обходятся без преференций от правительств. Такие проекты очень дорогие и редко дают мгновенную финансовую или большую социальную отдачу.

Выполнение такого крупного проекта, как создание РЛС МКП, невозможно без значительных инвестиций (государственных или частных), субсидий, льготных кредитов или налоговых преференций. Д. А. Фомин отмечает [58]: «Российская экономика, располагая крайне ограниченными инвестиционными ресурсами, тратит их главным образом не на создание новых перспективных производств и рабочих мест, а на поддержку существующих материальных активов». В связи с этим для уже начатой разработки РЛС-БС необходимо серьёзное и обоснованное заключение о целесообразности дополнительных субсидий со стороны головного предприятия или Правительства. Обоснование критерия необходимости финансовых интервенций в условиях сложной и неопределённой

экономической ситуации становится обязательным требованием для получения дальнейшей поддержки. Решение задачи оптимизации дополнительных выплат (объёма и моментов финансирования) в условиях сильной неопределённости является важным условием для эффективного использования государственных средств в рамках госконтракта.

Для разработки РЛС-БС проекта «Млечный путь» (24-32 рабочих места на две РЛС-БС - 35 миллиардов рублей) требуются не только крупные финансовые вложения или дешёвый кредит, но и научно обоснованная методика управления дополнительными финансовыми вложениями в условиях сильной неопределённости.

1.4 Направления совершенствования управления созданием РЛС

Для решения задач управления крупными проектами в условиях неопределённости и неполноты информации применяются гарантированные подходы [61]. В работе [61] В.И. Ширяев и А.А. Брагина предлагают цифровой двойник предприятия, который описывается нелинейными разностными уравнениями (1)

$$x_{k+1} = A(p)x_k + F(x_k, w_k, p) + B(p)u_k + D(p)w_k, \quad (1)$$

$$u_k = \Phi(x_k, w_k, p), k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (2)$$

где $x_k \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния предприятия в момент времени k ;

k – дискретное время;

$A(p)$ – матрица степени влияния текущего состояния предприятия на будущее состояние предприятия, ее элементы определяются вектором параметров предприятия;

$p \in \mathbb{R}^s$ – вектор параметров предприятия;

$F(x_k, w_k, p)$ – нелинейная вектор-функция, связывающая состояние предприятия, возмущения и параметры предприятия;

w_k – возмущения;

$B(p)$ – матрица степени влияния управления на будущее состояние предприятия;

$u_k \in \mathbb{R}^m$ – вектор управления предприятием;

$D(p)$ – матрица степени влияния возмущений на будущее состояние предприятия;

$\Phi(x_k, w_k, p)$ – нелинейная вектор-функция управления.

В данном подходе при управлении проектом для оценивания состояния используется не традиционный фильтр Калмана, а так называемый гарантированный алгоритм (оценка x_k – не точка, а множество, в котором гарантированно находится вектор). Применительно к разработке РЛС это означает, что даже при отсутствии точных данных о ходе работ можно надёжно определить диапазон возможных значений технической готовности и бюджета.

Управление (2) финансовыми потоками (дополнительными вложениями для корректировки процесса) осуществляется посредством функций Ляпунова, что позволяет обеспечивать устойчивость системы при негативных возмущениях.

Работа [61] определяет одно из направлений исследований в области управления финансовыми потоками для контроля крупных проектов. Предложенные в [61] модель и алгоритм гарантированного оценивания обладают рядом важных свойств: робастностью, гарантированностью результата и учётом корреляции параметров. Использование допустимых множеств (например, многогранников) для представления неопределённости позволяет корректно учитывать взаимосвязь показателей системы при определении области допустимых состояний. Аналогичные выводы

приведены в работе [19; 29]. Основы гарантированного оценивания в условиях неопределённости заложены в работах А.Б. Куржанского [13].

Рассмотрим применимость гарантированного подхода [61] к разработке РЛС МКП.

Согласно [61] неопределенность имеет статические границы (допустимые множества задаются априорно), допустимые значения описывается выпуклыми компактами без учета динамики. Хотя x_k эволюционирует, но накопления информации не происходит. Именно это обстоятельство определяет по А.Ю. Шокину [40] вектор совершенствования предлагаемого метода: изменение объема информации на всех этапах ЖЦ во время разработки должно прямо влиять на уровень неопределенности.

Модель В.И. Ширяева и А.А. Брагиной (1) записана достаточно обобщенно для промышленности. Для описания процесса разработки РЛС необходимо учесть не только конкретные параметры или показатели процесса, но и особенности их динамики: оптимальную скорость разработки, скорость изменения готовности модулей, эффект насыщения.

Матрицы $A(p)$, $B(p)$ и $D(p)$ не меняются во времени, что не может описывать процесс разработки РЛС. Это связано с тем, что каждый этап ЖЦ создания комплекса РЛС обладает своей спецификой [5; 10]. Соответственно – в модели процесса разработки необходимо рассчитывать параметры по-разному на разных этапах ЖЦ. Например, на одном этапе необходимо использовать количество функциональных систем и количество конструкторов, а на другом – количество производственных линий, количество модулей и их трудоемкость.

В работе В.И. Ширяева риск задан косвенно, через функции Ляпунова (как некоторый критерий устойчивости), что для модели (1) вполне достаточно. Однако в условиях сильной неопределенности, когда вероятностный подход не всегда корректен, требуется задать отдельный

показатель комплексного риска, значение которого и его динамика являлись бы индикаторами негативных тенденций.

Как отмечено в [55], “при классическом вероятностном подходе риск, связанный с принятием решений, оценивается с использованием функции потерь $z = f(x, y)$, где $x \in \mathbb{R}^n$ представляет решение, $y \in \mathbb{R}^n$ – возможные будущие значения переменных, описывающих состояние системы. Если вектор y случаен, потери являются случайной величиной, закон распределения которой определяется выбором управления x . Любая задача оптимизации, связанная с оценкой потерь в зависимости от принятого решения, должна учитывать не только ожидаемые потери, но и риски, обусловленные самим решением.

Меру риска (как функционал в пространстве распределений) называют когерентной, если она положительно однородна, инвариантна относительно сдвигов, монотонна и субаддитивна. Из субаддитивности и положительной однородности следует выпуклость меры риска. С учетом этого иногда под когерентной понимают меру риска, которая выпукла и инвариантна относительно сдвигов.

Возможная неаддитивность меры риска не позволяет применять непосредственно интеграл Лебега для оценки математического ожидания. Избежать затруднений помогает интегрирование по Шоке.”

Когерентные меры риска, как и любые вероятностные методы, предполагают возможность построения распределения потерь. В работах С.Ф. Боева и других авторов, посвящённых управлению созданием РЛС, риск также часто оценивается через вероятностные характеристики или прямое сравнение фактических и плановых показателей. В условиях фундаментальной неопределённости, характерной для разработки РЛС МКП, такие распределения не могут быть обоснованы.

Управление на основе устойчивости полезно и довольно эффективно в рамках модели (1.1), однако не рассмотрена защита от неконтролируемого

расходования средств. В рамках исследования механизмов контроля разработки РЛС необходимо ввести критерий, который бы проверял целесообразность выделения средств. Иначе отдача от проекта может стать несоразмерной затраченным средствам.

Область допустимых значений задается информационным множеством (как пересечение множества прогнозов и множества измерений). Согласно работе [61]: «Информационные множества могут быть аппроксимированы выпуклыми многогранниками с использованием их неявного задания системами линейных неравенств и уравнений». Область допустимых значений как «эллипсоид неопределенности» использовали Н.П. Будко и Ф.Л. Черноусько [19; 29]. Необходимо добавить более подробный механизм динамических границ такой области, чтобы описывать изменение неопределенности во время разработки РЛС. Выход из области допустимых значений может быть одним из этапов обоснования для дополнительного финансирования.

Проведённый анализ показывает, что подходы, предложенные В.И. Ширяевым, А.А. Брагиной, А.Ю. Шокиным, А.М. Ленихиным, Н.А. Махутовым, Н.П. Будко, О.В. Крюковым, С.Ф. Боевым, А.П. Линкевичиусом, А.С. Логовским обладают несомненными достоинствами. Но данные подходы по отдельности содержат определенные недостатки. Возможные дополнения и направления совершенствования, выражающиеся как в гибриде известных методов, так и в новых действиях при управлении, являются ключевыми для совершенствования теории об управлении разработкой крупных проектов в целом.

1.5 Постановка научной задачи исследования

Анализ показал ключевое противоречие. С одной стороны – необходимо гарантированно создавать сложные РЛС ДО, но при этом не хватает данных,

ресурсы ограничены и возникают непредвиденные проблемы. С другой стороны, использовать традиционные методы управления либо некорректно, либо эти методы требуют существенной переработки. Эти методы используют в основном статические оценки риска. Управленческая реакция может запаздывать, а выводы являться ошибочными. Они не учитывают динамическую взаимосвязь технических и финансовых параметров проекта.

Следовательно, научная задача, решаемая в диссертации, формулируется следующим образом: разработать модель и методику управления созданием РЛС МКП, которые обеспечивают оперативную оценку комплексного риска срыва сроков разработки для обоснования финансовых решений, направленных на успешное завершение разработки.

Такая оценка должна опираться на анализ фактического бюджета и динамики технической готовности в режиме реального времени. Методика обязана обеспечить гибкое управление финансированием. Это нужно для удержания проекта в границах допустимого риска на всех этапах жизненного цикла РЛС МКП. Для решения задачи необходимо:

- 1) разработать математическую модель динамики разработки РЛС;
- 2) определить показатель комплексного риска;
- 3) разработать алгоритмы расчёта адаптивного финансирования для возврата траектории проекта в требуемую зону.

Научная задача данного исследования коррелирует с проблемами из других работ: необходимость учёта взаимного влияния технических и финансовых рисков, дефицит исходных данных на ранних этапах жизненного цикла, потребность в адаптивном управлении в условиях фундаментальной неопределённости.

Задачу можно сформулировать как задачу многокритериальной векторной оптимизации.

Пусть есть некоторая область допустимых рисков $\Omega(t)$. Выход из нее траектории разработки РЛС будем считать негативным сигналом.

Тогда состояние разработки РЛС МКП в момент времени t можно описать кортежем (3)

$$X(t) = \langle G(t), C(G(t)), R(t) \rangle, \quad (3)$$

где $X(t)$ – состояние разработки РЛС МКП;

$t \in T$ – время;

$G(t)$ – текущие уровни технической готовности отдельных компонентов РЛС МКП ($G(t) \in [0; 1]$);

$C(G(t))$ – совокупный объём задействованных финансовых ресурсов (руб.);

$R(t)$ – комплексный показатель риска разработки.

Модель разработки РЛС МКП (4) задаётся как алгебраическая система (в смысле [37])

$$M = \langle X(t), Q, E, U, F \rangle, \quad (4)$$

где M – модель разработки РЛС МКП;

Q – набор различных проектных, производственных и испытательных параметров разработки на разных этапах ЖЦ;

E – множество возмущающих факторов, влияющих на готовность во время разработки;

U – множество возможных управляющих финансовых воздействий;

F – множество отношений между элементами $X(t)$, Q , E .

Требуется найти модель M (4). Модель должна учитывать особенности разработки РЛС МКП создавать основу для определения оптимального или приемлемого объема управляющих финансовых воздействий U .

Введем комбинированный функционал (5)

$$J(u) = \alpha R_M + \beta \frac{1}{h(G(T), C(0), \sum_{i=1}^n u_i)}, \quad (5)$$

где $J(u)$ – функционал совокупного риска и эффективности;

$u \in U$ – вектор дополнительного финансирования, представляющий собой набор из n платежей;

α – положительная константа влияния риска;

R_M – суммарный показатель комплексного риска, рассчитанный посредством модели (4);

β – положительная константа влияния эффективности;

$h(G(T), C(0), \sum_{i=1}^n u_i)$ – эффективность использования дополнительных вложений $h \in [0; 1]$;

$T \in R^+$ – длительность разработки;

$C(0)$ – начальный бюджет;

n – количество дополнительных выплат для поддержания проекта (финансовых траншей);

u_i – объём i -го дополнительного финансирования;

i – индекс дополнительного финансирования.

Необходимо найти такое множество управляющих воздействий (6)

$$u^* = \operatorname{argmin}(J(u)), \quad (6)$$

при ограничениях на готовность, финансирование и эффективность дополнительных вложений (7) - (9)

$$G(T) = 1, \quad (7)$$

$$u^* \leq u_{\text{допуст}}, \quad (8)$$

$$h \leq h_{\text{допуст}}, \quad (9)$$

где $u_{\text{допуст}}$ – допустимый объем дополнительных финансовых вложений;
 $h_{\text{допуст}}$ – допустимая эффективность дополнительных вложений (защита от нерационального вливания средств).

Данная задача относится к классу задач оптимального управления, теоретическую основу которых составляют принцип максимума Понтрягина [18; 26; 50], его обобщения при наличии фазовых ограничений [30] и скользящих режимов [31; 32], а также современные расширения для смешанных ограничений [62] и нейросетевых моделей [66] (и ранние работы по приложениям экстремальных задач к теории оптимального управления [68]).

1.6 Выводы об особенностях создания РЛС МКП

1) Процесс создания РЛС МКП характеризуется исключительной сложностью, значительной продолжительностью и масштабной кооперацией, что соответственно сопровождается техническими и финансовыми рисками, взаимное влияние которых приносит деструктивный характер в процесс разработки РЛС. В настоящее время при управлении процессом создания ни Заказчиком, ни Разработчиком указанное влияние рисков не учитывается и соответственно научно-обоснованных действий по корректировке процесса не осуществляется. Как правило, технические риски оцениваются в части возможного несоответствия текущих характеристик создаваемой РЛС заданным требованиям, что обуславливает необходимость перепроектирования, а финансовые риски – в значительной степени

определяются волатильностью стоимости ее компонент, нарушениями поставок модулей и блоков и графика финансирования.

Несмотря на длительную историю исследования как технических, так и финансовых рисков, проводившихся независимо друг от друга, существующие методы оценки рисков не позволяют достичь необходимой точности и оперативности, что в свою очередь приводит к снижению эффективности управления процессом создания РЛС по причине высокой степени неопределенности.

2) По результатам анализа научно-методического аппарата существующих научных школ сформулированы направления совершенствования системы риск-анализа А. Ю. Шокина для оперативной и точной оценки процесса разработки РЛС в условиях недостатка данных и их фундаментальной неопределённости, когда применение современных технологий цифровых двойников невозможно или нецелесообразно. Основными требованиями к научно-методическому аппарату оценки риск-анализа процесса разработки являются:

- учет последовательных переходов между этапами,
- учет априорных изменений при прогнозировании в условиях дефицита исходных данных,
- учет каскадного эффекта изменений,
- снижение негативного влияния фундаментальной неопределенности (непредсказуемые события) при прогнозировании значений ключевых показателей разработки и последующем управлении дополнительным финансированием в долгосрочном проекте,
- учет технико-экономических рисков,
- затратность адаптивного моделирования,
- адекватное описание переходов.

3) В качестве научной гипотезы обоснована возможность решения задачи разработки единого математического аппарата, обеспечивающего

одновременный учет технологических и финансово-экономических факторов на всех этапах жизненного цикла разработки модулей РЛС для оценки состояния разработки и последующее управление денежными потоками в условиях неопределенности.

Научная гипотеза заключается в том, что объективное моделирование процесса разработки РЛС МКП возможно через математическую формализацию процесса при дефиците априорных данных о разработке. Учет истории изменений показателей (например готовности модулей РЛС, бюджета и риска) может быть представлен комплексной системой уравнений, определяющих зависимость между предложенными показателями, неучтенными факторами и управляющими воздействиями, что должно повысить точность прогноза (уменьшить оценку разброса прогнозируемых величин), а также предоставить инструмент расчета дополнительных денежных выплат для ликвидации неучтенных факторов.

4) Для реализации адаптивного к неучтенным дестабилизирующим факторам управления финансированием, необходимо определить ключевые показатели разработки и обосновать связи между ними. Построенная модель должна обеспечить описание процессов разработки, установить зависимость ключевых выходных параметров системы от управляющих воздействий и лечь в основу методики оперативной оценки и последующего управления ходом создания комплекса.

Глава 2

Математическая модель разработки радиолокационной станции

В данной главе Построена математическая модель разработки РЛС, отличающаяся от известных:

1) процесс разработки описан в виде динамических траекторий, формируемых на основе дифференциальных уравнений с учетом неопределенности данных об изменении готовности компонентов РЛС и возможности адаптивного финансирования их разработки;

2) параметры модели (коэффициент адаптации, оптимальная скорость разработки) определяются для различных этапов ЖЦ на основе технологических и ресурсных характеристик проекта.

Это позволяет оперативно получать оценку текущего комплексного показателя риска и при необходимости формировать корректирующие управляющие воздействия (в том числе и при отсутствии цифровых двойников изделия).

2.1 Назначение модели разработки РЛС

Разработка РЛС является масштабным и долгосрочным проектом, а его реализация осуществляется в условиях фундаментальной неопределенности на всех этапах ЖЦ [25]. Разработка РЛС обычно декомпозируется на следующие стадии [24]:

- создание эскизной документации;
- разработка конструкторской документации;
- изготовление опытного образца изделия;
- испытания изделия.

Эти этапы могут быть разбиты на более мелкие стадии, однако в данной работе будем рассматривать разработку «сверху-вниз», не прибегая к декомпозиции всех процессов на подпроцессы (где часто используется агентное моделирование). Первые два этапа из-за их схожих особенностей внутренних процессов будут объединены в один – «проектирование». Следующий этап назовем «изготовление», последний – «испытания». Данное упрощение имеет определенные перспективы, так как относительно простые связи в модели позволяют выявить некоторые общие закономерности.

Техническое задание (далее – ТЗ) и государственный контракт являются направляющими документами для: плана-графика работ, сметной стоимости, плана материально-технического обеспечения и плана капитального строительства [5]. Таким образом, «проектирование» выделяется в отдельный этап, на котором формируются данные документы. Именно на этом этапе могут быть допущены существенные ошибки из-за неправильного учета возмущающих факторов.

Как было показано в первой главе, существующие модели, применяемые для описания процесса разработки сложных технических систем, не позволяют [9; 10; 13; 40]:

- учитывать динамику изменения информации и уровня неопределённости на разных стадиях жизненного цикла (проектирование, изготовление, испытания), где риск перестаёт быть статическим показателем;
- строить адекватное планирование в условиях дефицита исходных данных и фундаментальной неопределённости, когда вероятностные подходы недостаточно обоснованы;
- учитывать неопределенности как финансового характера, так и технической готовности.

При этом зависимость между финансированием и скоростью выполнения работ в рамках ОКР как правило носит нелинейный характер, проявляющийся в: а) асимптотическом стремлении темпов работ к нулю при

дефиците финансирования, б) выходе на горизонтальную асимптоту (предельную производственную мощность) при оптимальном ресурсном обеспечении, в) эффекте насыщения при избыточном финансировании вследствие действия закона убывающей отдачи, гласящего, что добавление ресурсов (например, разработчиков) к проекту после определенного момента дает все меньше прироста производительности, а иногда и снижает ее [7].

Указанные особенности определяют необходимость создания модели разработки РЛС, учитывающей неопределенности данных о технической готовности ее компонентов, организационно-финансовых ресурсах, а также характеристиках научно-технического задела разработчика. Такая модель нужна для управления ходом разработки РЛС – определения оптимального порядка финансированием, обеспечивающего поддержания приемлемого уровня риска для достижения заданной технической готовности РЛС в регламентированные сроки. Это соответствует представлению процесса разработки РЛС в фазовом пространстве состояний «техническая готовность компонентов – стоимость» (или в кинетическом портрете: «техническая готовность компонентов – бюджет – время»).

Задачами разрабатываемой модели являются:

- 1) построение и анализ фазовых (в двухмерном пространстве готовность-бюджет) и кинетических (в трехмерном пространстве готовность-бюджет-время) траекторий разработки для визуализации динамики процесса и для прогнозирования значений показателей;
- 2) создание условий для расчета комплексного риска (с учетом предыдущей истории изменений ключевых показателей разработки).

Под фазовым пространством в диссертации понимается множество всевозможных состояний процесса разработки РЛС, а под фазовой траекторией – изменение параметров процесса разработки РЛС в фазовом пространстве.

Указанные задачи могут быть решены с использованием дифференциальных уравнений (далее – ДУ), позволяющих адекватно формализовать динамическую природу риска. Динамическая модель обеспечивает корректное описание:

- эволюции уровня неопределенности оценки текущей технической готовности компонентов во времени через изменяющиеся параметры распределений стохастических возмущений;
- нелинейных связей со скоростью изменения некоторой величины (в данной работе – готовности) с уровнем неопределенности;
- кумулятивного эффекта накопления информации и знаний [8; 40].

ДУ позволяют также проводить моделирование различных вариантов хода создания РЛС через вариацию начальных условий и параметров. Это предоставляет возможность для проведения анализа рисков в условиях, когда традиционные статистические подходы неприменимы из-за отсутствия репрезентативных данных. Опыт применения нейросетевых обыкновенных дифференциальных уравнений для непрерывного прогнозирования рисков [76] подтверждает универсальность динамического подхода.

Для корректной постановки вышеуказанных задач при неполной и изменяющейся во времени информации в процесс разработки РЛС приняты следующие допущения:

- 1) Наибольший уровень неопределенности характерен для первого этапа жизненного цикла создания РЛС (этапу проектирования) [23].
- 2) На ранних этапах изменение готовности характеризуется медленным ростом [10].
- 3) По мере накопления данных о технической готовности РЛС неопределенность снижается, что приводит к снижению риска разработки (уменьшается математическое ожидание ущерба и его мера разброса) [43].
- 4) По мере накопления данных изменение готовности асимптотически стремится к некоторому значению, характеризующему

полное выполнение требований и задач процесса разработки РЛС и ее компонент.

5) Увеличение финансирования разработки компонент РЛС сверх оптимального уровня (цены контракта) не компенсирует технологические ограничения или ошибки проектирования (согласно закону убывающей отдачи от вложенных средств) [7]).

6) Существует возможность выделения дополнительных финансовых средств для устранения ошибок, допущенных при проектировании и/или изготовлении компонентов РЛС.

Перечисленные допущения носят качественный характер и описывают причинно-следственные связи между основными сущностями процесса «неопределённость – риск», «финансирование/ресурсы – темп готовности» и «ограничения – насыщение». Такие допущения позволяют задать четкие рамки и требования для математической формализации динамической нелинейной управляемой модели, способной отразить эволюцию, нелинейность и управляемость системы.

2.2 Формализация показателей процесса разработки РЛС

Согласно [23], процесс разработки РЛС укрупненно можно представить тремя этапами: проектирование, изготовление и испытания. Будем считать, что невыполнение требуемых показателей на одном из этапов приводит к увеличению его длительности, а переход не осуществляется до того момента, пока разработка на предыдущем этапе не будет полностью завершена.

Под готовностью РЛС будем понимать такой показатель $G(t) \in [0; 1]$, который объединяет в себе выполнение всех заложенных в техническом задании требований на всех этапах жизненного цикла ее разработки.

Суммарная готовность $G(t) \in [0; 1]$ по этапам создания РЛС определяется по формуле (10)

$$G(t) = G_{\text{пр}}(t) + G_{\text{из}}(t) + G_{\text{ис}}(t), \quad (10)$$

где $G(t)$ – суммарная готовность в момент времени t ;
 $G_{\text{пр}}(t)$ – готовность на этапе проектирования;
 $G_{\text{из}}(t)$ – готовность на этапе изготовления;
 $G_{\text{ис}}(t)$ – готовность на этапе испытаний.

Формула (10) описывает только принцип декомпозиции этапов и может быть использована при построении иерархии процессов создания РЛС, при построении диаграммы Ганта или разработке сетевых моделей. Основной недостаток такой аддитивной декомпозиции заключается в её статической природе – она фиксирует состояние, но не описывает процесс перехода между этапами, их взаимное влияние на изменение готовности.

В этой связи будем полагать, что суммарная готовность $G(t) = 1$, если на требуемый компонент подготовлена проектная и рабочая документация на этапе проектирования, компонент изготовлен и прошел все требуемые проверки, а также успешно прошел испытания в составе РЛС.

Готовность $G(t)$ будет меньше 1, если хотя бы один из процессов выше приводит к увеличению сроков и/или стоимости разработки РЛС.

При этом, поскольку стоимость работ подвержена волатильности при большом горизонте прогнозирования то, как показано в [25], в дальнейшем в работе будем рассматривать не стоимость, а остаток бюджета на каждый из этапов жизненного цикла РЛС, который определяется кусочно-заданной функцией (11)

$$C(G(t)) = \begin{cases} C_0, G \in [0; G_0) \\ C_n, G \in [G_{n-1}; 1) \\ 0, G = 1 \end{cases} \quad (11)$$

Введение функции остатка бюджета $C(G(t))$ необходимо в модели разработки РЛС для планирования затрат и анализа текущего финансового ресурса. Этот объем финансовых ресурсов доступен для выполнения работ в каждый момент времени t .

Проведенные в диссертации исследования показали, что допущения, принятые при формализации модели разработки РЛС и ее компонентов, могут быть достаточно корректно описаны так называемым логистическим уравнением Ферхюльста [34; 59].

С его помощью можно описать динамику скорости изменения готовности $\dot{G}(t)$. Это позволяет моделировать ограниченный рост готовности с последующим насыщением. При малых значениях $\dot{G}(t)$ скорость изменения готовности компонента растет быстро. По мере приближения к оптимальному уровню b , ее рост замедляется, стремясь к равновесному состоянию, что соответствует реальному технологическому процессу. Таким образом, технологический процесс может быть описан уравнением (12)

$$\ddot{G}(t) = a \left(1 - \frac{1}{b} \dot{G}(t) \right) \dot{G}(t), \quad (12)$$

где $\ddot{G}(t)$ – темп изменения скорости готовности (характеризует, как быстро сама скорость работ $\dot{G}(t)$ увеличивается или уменьшается под влиянием выделенных ресурсов, накопленной информации и внешних возмущающих факторов);

a – коэффициент адаптации (стремление уровня готовности к оптимальному значению);

b – оптимальная скорость разработки;

$\dot{G}(t)$ – скорость изменения технической готовности в момент времени t .

Допущения об изменении уровня неопределенности в ходе разработки РЛС указывают на наличие неучтённых факторов, которые могут негативно влиять на данный процесс. Для их учета введём в (12) стохастическое возмущение $\varepsilon(t)$, которое непосредственно снижает скорость изменения готовности.

Значения $\varepsilon(t)$ определяются на основании гауссовского процесса. Будем считать, что в моменты времени t_1, \dots, t_n возникают неучтенные факторы, влияющие на темпы готовности. Значения $\varepsilon(t)$ для любого t из множества t_1, \dots, t_n определяются на основании нормального распределения $N(\mu, \sigma^2)$, где математическое ожидание и стандартное отклонение являются монотонно убывающими функциями времени. Таким образом, неопределенность к моменту завершения проекта убывает.

Предложенный подход отражает существенный рост предсказуемости процесса разработки на завершающих этапах разработки по сравнению с начальной фазой, для которой характерна максимальная энтропия, обусловленная незавершенностью большей части работ. Это позволяет:

- 1) учесть непредвиденные задержки и расходы, которые могут возникать на разных этапах ЖЦ;
- 2) связать стохастические возмущения с финансовыми ресурсами, когда для компенсации негативного воздействия $\varepsilon(t)$ требуется выделение дополнительных средств $u(t)$;
- 3) обосновать необходимость адаптивного финансирования: управление $u(t)$ позволяет вернуть проект в зону допустимого риска и обеспечить достижение целевых показателей готовности в установленные сроки.

С учётом стохастических возмущений $\varepsilon(t)$, характеризующих незапланированные потери скорости изменения готовности, уравнение (12) преобразуется в уравнение (13), где появляется в правой части $\varepsilon(t)$

$$\ddot{G}(t) = a \left(1 - \frac{1}{b} \dot{G}(t) \right) \dot{G}(t) - \varepsilon(t). \quad (13)$$

где $\varepsilon(t)$ – возмущающие факторы, влияющие на готовность компонентов РЛС во время их разработки.

Для компенсации $\varepsilon(t)$ (и чтобы a и b были больше нуля) необходимы финансовые ресурсы на реализацию разработки.

Далее, мы предполагаем, что вклад финансовых ресурсов в ускорение пропорционален доступной сумме бюджета. Тогда уравнение (13) преобразуется в уравнение готовности (14)

$$\ddot{G}(t) = a \left(1 - \frac{1}{b} \dot{G}(t) \right) \dot{G}(t) - \varepsilon(t) + c \left(C(G(t)) + u(t) \right), \quad (14)$$

где c – коэффициент преобразования финансовых ресурсов в скорость изменения готовности (1 / (рубль \times ед. время));

$C(G(t))$ – совокупный объём задействованных финансовых ресурсов (руб.);

$u(t)$ – дополнительные (управляемые) финансовые средства, выделенные на ликвидацию неучтенных задержек и расходов.

Уравнение (14) представляет собой содержательную часть модели, которая комплексно отражает ключевые аспекты процесса разработки, в том числе дестабилизирующее влияние возмущающих факторов и компенсирующую роль запланированных и управляемых финансовых ресурсов.

2.3 Комплексный риск разработки РЛС

Комплексный риск $R(t)$, согласно с (4) и (14), определяется ключевыми параметрами проекта в формуле (15)

$$R = \widehat{M}(G(t), C(t), \varepsilon(t), u(t), T), \quad (15)$$

где \widehat{M} – функционал комплексного риска, преобразующий значения параметров проекта в скалярную оценку риска;
 T – установленный срок разработки.

Основными ограничениями параметров проекта в (15) являются (7)-(9): временные ограничения $t \leq T$, технологические $0 \leq G(t) \leq 1$, бюджетные ограничения $\sum u(t) \leq U_{\text{допуст}}$.

В отличие от распространённых подходов расчет риска осуществляется [20] с использованием количественной меры отклонения фактических показателей разработки от (и на основе) детерминированного прогноза модели. Данная метрика является развитием, предложенного в [45; 47; 49] научно-методического аппарата.

Пусть даны следующие показатели фактической фазовой траектории и планируемой в момент времени t :

$G_{\text{п}}(t)$ – плановая техническая готовность;

$G_{\text{ф}}(t)$ – фактическая техническая готовность;

$T_{\text{ф}}(t)$ – затраченное на текущую готовность время;

$T_{\text{п}}(t)$ – плановое время текущую готовность;

$C_{\text{ф}}(t)$ – фактическое значение бюджета;

$C_{\text{п}}(t)$ – планируемое значение бюджета.

Зададим три показателя отклонений и будем далее интерпретировать оценку риска как отклонение.

Риск готовности определяется как в формуле (16) или в формуле (17)

$$R_{\Gamma}(t) = \max\left(0; \frac{G_{\Pi}(t) - G_{\Phi}(t)}{G_{\Pi}(t)}\right), \quad (16)$$

и

$$R_{\Gamma}(G_{\Pi}, G_{\Phi}) = \max\left(0; \frac{G_{\Pi} - G_{\Phi}}{G_{\Pi}}\right). \quad (17)$$

Аналогично определяется календарный риск в формуле (18) или в формуле (19)

$$R_{\text{кл}}(t) = \max\left(0; \frac{T_{\Phi}(t) - T_{\Pi}(t)}{T - T_{\Pi}(t)}\right) d, \quad (18)$$

или

$$R_{\text{кл}}(T_{\Pi}, T_{\Phi}) = \max\left(0; \frac{T_{\Phi} - T_{\Pi}}{T - T_{\Pi}}\right) d, \quad (19)$$

где d – экспертный коэффициент влияния календарного риска на общий.

Наконец, определим бюджетный риск формулой (20) или формулой (21)

$$R_{\text{б}}(t) = \begin{cases} \max\left(0; \frac{C_{\Pi}(t) - C_{\Phi}(t)}{C_{\Pi}(t)} + \frac{G_{\Pi}(t) - G_{\Phi}(t)}{G_{\Pi}(t)}\right), & C_{\Pi}(t) \neq 0 \\ \max\left(0; \frac{G_{\Pi}(t) - G_{\Phi}(t)}{G_{\Pi}(t)}\right), & C_{\Pi}(t) = 0 \end{cases}, \quad (20)$$

или

$$R_{\phi}(G_{\pi}, G_{\phi}) = \begin{cases} \max\left(0; \frac{C(G_{\pi}) - C(G_{\phi})}{C(G_{\pi})} + \frac{G_{\pi} - G_{\phi}}{G_{\pi}}\right), C_{\pi}(t) \neq 0 \\ \max\left(0; \frac{G_{\pi} - G_{\phi}}{G_{\pi}}\right), C_{\pi}(t) = 0 \end{cases}. \quad (21)$$

Метрика риска должна строиться как асимметричная функция, где отрицательные отклонения (отставание от графика, перерасход средств) увеличивают риск, а положительные – уменьшают его или, как минимум, не увеличивают. Это требует разработки или выбора специального показателя, способного содержательно интерпретировать многомерную динамику проекта в рамках единого показателя комплексного риска. Проблемы количественной оценки рисков инновационных проектов и интерпретации результатов испытаний компонентов РЛС рассматриваются в [39; 51].

В качестве математического аппарата для оценки комплексного показателя риска был выбран аппарат нечеткой логики. Использование нечеткости позволяет снижать влияние шума $\varepsilon(t)$ при построении области допустимого риска., как было показано в работах [52; 53].

Показатели $R_{\Gamma}(t)$, $R_{\text{кл}}(t)$ и $R_{\phi}(t)$ отражают степень отклонения от плана по каждому параметру. Как будет показано в главе 3, их последующее агрегирование в комплексный показатель риска R даёт комплексную нечёткую оценку комплексного риска, сохраняющую всю исходную неопределённость. Предлагаемый способ управления должен обеспечить более гибкое и адаптивное управление рисками, соответствующее реальной практике принятия решений в условиях неполной информации.

2.4 Формализация процесса разработки

В интересах поддержания показателя риска в заданных пределах модель разработки должна обеспечивать построение и анализ фазовых (в двухмерном

пространстве готовность-бюджет) и кинетических (в трехмерном пространстве готовность-бюджет-время) траекторий разработки РЛС, а также являться основой для оценки как текущего, так и прогнозного риска.

Кинетические траектории строятся на основе решений системы дифференциальных уравнений второго порядка с учётом скоростей изменения показателей разработки РЛС и служат для анализа динамики данного процесса, выявления критических режимов и оперативного управления рисками.

С учетом формализованного процесса изменения готовности (14) моделирование процесса разработки РЛС на всех этапах ЖЦ опишем в виде системы дифференциальных уравнений (22) второго порядка, включающей схему финансирования (11), смену значений параметров на этапах ЖЦ и начальные условия

$$\begin{cases} \ddot{G}(t) = a \left(1 - \frac{1}{b} \dot{G}(t) \right) \dot{G}(t) - \varepsilon(t) + c \left(C(G(t)) + u(t) \right) \\ C(G(t)) = \begin{cases} C_0, G \in [0; G_0) \\ C_n, G \in [G_{n-1}; 1) \\ 0, G = 1 \end{cases} \\ \dot{G}(0) = g \left(C(G(0)) \right) \\ G(0) = G_{\text{нач}} \end{cases}, \quad (22)$$

где $\ddot{G}(t)$ – темп изменения скорости готовности (характеризует, как быстро сама скорость работ $\dot{G}(t)$ увеличивается или уменьшается под влиянием выделенных ресурсов, накопленной информации и внешних возмущающих факторов);

a – коэффициент адаптации;

b – оптимальная скорость разработки;

$\dot{G}(t)$ – скорость изменения технической готовности в момент времени t ;

$\varepsilon(t)$ – возмущающие факторы, влияющие на готовность компонентов РЛС во время их разработки;

c – коэффициент преобразования финансовых ресурсов в скорость изменения готовности ($1 / (\text{рубль} \times \text{ед. время})$);

$C(G(t))$ – совокупный объём задействованных в разработке финансовых ресурсов (руб.);

$G(t)$ – текущие уровни технической готовности отдельных компонентов РЛС ($G(t) \in [0; 1]$);

$u(t)$ – дополнительные (управляемые) финансовые средства, выделенные на ликвидацию неучтенных задержек и расходов;

$g(C(G(0)))$ – выбор начальной скорости изменения готовности в зависимости от размера авансового платежа;

$G_{\text{нач}}$ – начальная готовность отдельных компонентов РЛС.

Точками обозначается производная по времени.

Коэффициент адаптации (под которым в диссертации понимается скорость максимального темпа роста технической готовности) необходим для масштабирования управляющих воздействий $u(t)$ в зависимости от величины отклонения траектории и скорости её изменения. Коэффициент адаптации обеспечивает пропорциональность корректирующего финансирования уровню риска разработки РЛС;

Начальный уровень технической готовности компонентов РЛС $G(0)$ определяется степенью унификации и наличием проектно-конструкторского задела. В случае полной готовности конструкторской документации, наличия опытных образцов компонентов и испытательных стендов начальная готовность принимает высокие значения. Начальная готовность $G(0)$ в уравнении (22) определяется специальным образом.

Начальная скорость изменения готовности компонент разработки $\dot{G}(0)$ зависит от объёма начального бюджета, выделенного на этап разработки, который определяется величиной авансового платежа.

Зададим в формуле (23) функцию начальных условий

$$g(C(G(0))) = c \frac{C(G(0))}{C_{max}} b, \quad (23)$$

где C_{max} – максимально возможный бюджет для этапа разработки, при котором достигается оптимальная скорость разработки b ;

$C(G(0))$ – начальный бюджет или начальный совокупный объём задействованных финансовых ресурсов.

Функция $g(C(G(0)))$ формализует связь между начальным финансированием и начальной скоростью изменения готовности, что важно для моделирования реалистичных траекторий разработки РЛС в условиях ограниченных ресурсов и неопределённости. Её вид может уточняться на основе исторических данных или экспертных оценок.

Введение коэффициента преобразования c в (22) и (23) имеет важное значение. Он отражает причинно-следственную связь между объёмом финансовых ресурсов и ростом темпа выполнения работ и позволяет рассчитывать прирост скорости роста готовности, который даст выделение дополнительных средств.

Параметр c определяет, насколько эффективно дополнительные финансовые ресурсы воздействуют на корректировку фазовой траектории разработки для ее нахождения в зоне допусков. Поскольку $G(t)$ – безразмерная величина ($G(t) \in [0; 1]$), а её производная $\dot{G}(t)$ имеет размерность (1/время), то для обеспечения размерностной согласованности в уравнении (22) параметр c должен иметь размерность (1 / (рубль × время)).

Введение коэффициентов a , b и c необходимо для согласованности и адекватности модели. Они позволят объективно отображать показатели процесса разработки РЛС в виде траекторий конкретных ее компонентов.

Этап проектирования.

На этапе испытаний коэффициент адаптации a , т.е. скорость проектной деятельности или штраф за перегрузку персонала, может меняться, оптимальная скорость проектирования b (на этапе проектирования остается неизменной).

Для повышения точности описания этапа проектирования в рамках решения первой задачи модели разработки РЛС зададим оптимальную скорость проектирования формулой (24)

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{фс}}} Y_i N_{\text{констр}} F_{\text{раб}}}{N_{\text{фс}} \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{фс}}} T_{\text{норм}j}}{N_{\text{фс}}}}, \quad (24)$$

где b – оптимальная скорость проектирования;

$N_{\text{фс}}$ – количество функциональных систем;

i – номер функциональной системы;

Y_i – унификация i -й функциональной системы (от 0 до 1);

$N_{\text{констр}}$ – количество конструкторов и разработчиков;

$F_{\text{раб}}$ – полезное среднее общее время на проект (на одну ставку конкретно на данную разработку);

$T_{\text{норм}j}$ – нормативная трудоемкость проектирования одной функциональной системы.

Унификация отдельной функциональной системы стандартно вычисляется по формуле (25)

$$Y = \frac{\tau_0}{\tau_0 + \tau_1}, \quad (25)$$

где Y – унификация функциональной системы;
 τ_0 – трудозатраты на готовые компоненты;
 τ_1 – трудозатраты на новые компоненты.

Коэффициент унификации никогда не достигает значение 0, хоть и может быть близок к нему, поскольку ни один модуль не может быть разработан с нуля без каких-либо аналогичных разработок. Получение новых разработок невозможно без использования старых знаний.

Мы предполагаем, что на данном этапе все системы могут разрабатываться параллельно.

Определим коэффициент адаптации формулой (26)

$$a = \begin{cases} ka_1, & \text{если } \dot{G}(t) \in [0; b] \\ ka_2, & \text{если } \dot{G}(t) \in [b; \infty) \end{cases}, \quad (26)$$

где a – коэффициент адаптации;
 a_1 – скорость проектной деятельности;
 a_2 – штраф за перегрузку персонала;
 k – масштабирующий коэффициент.

Определим скорость проектной деятельности a_1 формулой (27)

$$a_1 = \frac{b}{T_{\text{пр}}}, \quad (27)$$

где $T_{\text{пр}}$ – продолжительность этапа проектирования.

Зададим штраф за перегрузку a_2 формулой (28)

$$a_2 = \frac{N_{\text{фс}}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{фс}}} Y_i}. \quad (28)$$

Этап изготовления.

Обозначим через b – оптимальную загрузку производственных линий (не меняется на этапе изготовления), через a – коэффициент адаптации, т.е. коэффициент гибкости производства или штраф за перегрузку производства (может меняться на этапе изготовления).

Для адекватного описания траектории разработки РЛС на этапе изготовления определим оптимальную скорость изготовления или оптимальную загрузку производственных линий формулой (29)

$$b = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^N F_{\text{линии}}}{t_{\text{шт}}}, \frac{\sum_{j=1}^n k_{\text{ПГ}j}}{n} V_{\text{max}} \right), \quad (29)$$

где b – оптимальную скорость изготовления;

N – количество производственных линий под разработку;

i – индекс производственной линии;

$F_{\text{линии}}$ – доступное время работы одной линии i в месяц (ч.);

$t_{\text{шт}}$ – время изготовления одного блока (ч.);

n – это количество компонентов, по которым усредняется показатель готовности;

j – индекс структурного компонента;

$k_{\text{ПГ}j}$ – коэффициент технологической готовности производств, необходимых для изготовления структурного компонента [10], при этом $k_{\text{ПГ}j} \in [0; 1]$;

V_{max} – максимум производства (при отсутствии ограничений по готовности технологий, комплектующих и кадров).

Зададим коэффициент адаптации a по формуле (26), в которой переопределим a_1 как коэффициент гибкости производства, a_2 как штраф за перегрузку производства.

Зададим коэффициент гибкости производства a_1 формулой (30)

$$a_1 = \frac{b}{T_{из}}, \quad (30)$$

где $T_{из}$ – продолжительность этапа изготовления.

Коэффициент a_2 – это обратная величина средней готовности, вычисляемый по формуле (31)

$$a_2 = \frac{1}{\overline{k_{пг}}}, \quad (31)$$

где $\overline{k_{пг}}$ – средний коэффициент производственной готовности по всем компонентам (средняя готовность технологий и мощностей для производства модулей).

Этап испытаний.

Зададим коэффициент адаптации a , т.е. коэффициент оперативности испытательного цикла или штраф за процедуру испытаний (может меняться на этапе испытаний).

Определим технологический потолок испытаний формулой (32)

$$b = \frac{N_{\text{стенда}} F_{\text{стенда}}}{t_{\text{цикл}}}, \quad (32)$$

где b – технологический потолок испытаний;
 $N_{\text{стенда}}$ – количество испытательных стендов;
 $F_{\text{стенда}}$ – полезное общее время стенда;
 $t_{\text{цикл}}$ – длительность цикла испытаний.

Т.е. параметр b показывает, сколько циклов испытаний можно провести, если все стенды работают исправно, компоненты готовы к испытаниям. Определим коэффициент адаптации по формуле (26), где a_1 – коэффициент оперативности испытательного цикла, a_2 – штраф за процедуру испытаний.

Зададим коэффициент гибкости производства a_1 формулой (33)

$$a_1 = \frac{b}{T_{\text{ис}}}, \quad (33)$$

где $T_{\text{ис}}$ – продолжительность этапа испытаний.

Зададим штраф за процедуру испытаний a_2 формулой (34)

$$a_2 = \frac{t_{\text{цикл}}}{t_{\text{анализа}}}, \quad (34)$$

где $t_{\text{анализа}}$ – время анализа результатов одного цикла испытаний.

2.5 Описание модели

Первое уравнение (14) системы (22) представляет собой автономное дифференциальное уравнение второго порядка. Его структура отражает

фундаментальные свойства процессов разработки. Первое слагаемое в (22), обозначаемое формулой (12), описывает логистический рост – характерное замедление темпов разработки по мере приближения к завершению проекта. Остальные слагаемые моделируют баланс между неучтенными возмущающими факторами, бюджетом и финансовыми управляющими воздействиями.

Проанализируем первое уравнение системы (без учета управления). Такое представление обеспечивает возможность построения и анализа фазовых и кинетических траекторий процесса разработки РЛС, что является основой для последующей оценки рисков и обоснования управляющих финансовых воздействий.

Пусть на всех этапах оптимальная скорость разработки $b = 1$, коэффициент адаптации $a = 1$, коэффициент преобразования $c = 1$, управляющие воздействия $u = 0$, и пусть $d = -\varepsilon(t) + C(G(t))$. Рассмотрим случай, когда $d = 0$, что демонстрируется в формуле (35)

$$\ddot{G}(t) = (1 - \dot{G}(t)) \dot{G}(t). \quad (35)$$

Данная ситуация означает, что возмущающие факторы вызывают дополнительные расходы, что приводит к торможению темпов готовности, однако ε полностью укладываются в изначальный бюджет C . Тогда уравнение из (35) является логистическим уравнением [12]. относительно производной. Если положить $\dot{G}(t) = x$, тогда уравнение (35) преобразуется в формулу (36)

$$\dot{x} = (1 - x)x. \quad (36)$$

Необходимо отметить, что на этапе проектирования сложно своевременно диагностировать отклонения показателей процесса разработки РЛС, однако они могут проявляться как замедление темпов роста готовности.

Логистическое уравнение (36) демонстрирует свойство модели – способность отражать темпы готовности с насыщением. Темп роста готовности стремится к некоторому оптимальному пределу, который задается внутренними ресурсами и ограничениями системы. Такая формализация адекватно отражает закон убывающей отдачи.

Анализ поведения решений логистического уравнения и его модификации (14) позволяет выявить зависимости между финансированием, готовностью и риском и найти условия, при которых параметрах фазовая траектория $X(t)$ выходит на устойчивый режим. Это даёт количественную основу для принятия решений о дополнительном финансировании.

Для учета влияния на темпы готовности изначального бюджета и возмущающих факторов рассмотрим уравнение (37)

$$\ddot{G}(t) = (1 - \dot{G}(t))\dot{G}(t) - d, \quad (37)$$

в котором $d \neq 0$.

При $\dot{G}(t) = x$ уравнение (37) преобразуется в формулу (38)

$$\dot{x} = (1 - x)x - d. \quad (38)$$

Вид интегральных кривых в (38) усложняется в зависимости от значения поправки $d = -\varepsilon(t) + C(G(t))$, отражающей соразмерность возмущающих факторов и начального бюджета.

Предположим сначала, что d – ненулевая постоянная.

Пусть $d > 0$. Это означает, что в бюджет заложено больше средств, чем требовалось. Будем считать, что остаток средств идет на ускорение разработки компонент РЛС. Это предположение является аналогом допущений в экономике о том, что остатки неизрасходованных средств мгновенно

реализуются для получения большей прибыли [46]. Альтернативный вариант расчета – средства откладываются в бюджет для дальнейшего использования.

Пусть $d < 0$. В этом случае не все факторы, влияющие на скорость изменения готовности, были учтены в изначальном бюджете. Будем считать, что неучтенные факторы могут влиять на вид фазовых траекторий. Это приводит к отрицательному воздействию на скорость изменения готовности, а при превышении неучтенными факторами определенного критического порога – к остановке роста показателя готовности. Экономически это объясняется возникновением непредвиденных издержек.

Существование критического порога означает необходимость реализации минимально допустимой скорости выполнения работ на всех этапах ЖЦ. Несоблюдение этого требования повышает риск несвоевременной разработки РЛС.

При значениях параметра $0 < d < 1/4$ возможны следующие ситуации:

- малый бюджет приведет к тому, что скорость изменения готовности будет падать и приведет к остановке роста готовности;
- в случае среднего бюджета скорость изменения готовности будет расти слабо;
- в случае большего бюджета – темпы не будут расти, а будут постепенно приближаться к некоторой границе.

Аналитическое решение описывается формулой (39)

$$x = \frac{1}{2} + \frac{2\sqrt{\frac{1}{4} - d}}{C e^{2t\sqrt{\frac{1}{4} - d}} - 1} + \sqrt{\frac{1}{4} - d}. \quad (39)$$

Имеются два положения равновесия в (39): неустойчивое и устойчивое. При скорости готовности ниже критического порога процесс разработки замедляется до привлечения дополнительных финансовых ресурсов на

устранение проблемной ситуации, выше порога – выходит на устойчивый режим работы.

При значениях параметра $d = 1/4$ возможны только две следующие ситуации:

- малый бюджет приведет к тому, что скорость изменения готовности будет падать и вплоть до остановки роста готовности;
- в случае большего бюджета – темпы не будут расти, а будут постепенно приближаться к некоторой границе.

При значениях параметра $d = 1/4$ общее решение описывается формулой (40)

$$x = \frac{1}{2} + \frac{1}{t + C}. \quad (40)$$

Имеется одно положение равновесия (неустойчивое) в (40).

Стационарные точки удовлетворяют уравнению (41)

$$(1 - x)x - d = 0. \quad (41)$$

При значениях параметра $d > 1/4$ возможна только одна ситуация, когда бюджета может не хватить для полноценной организации процесса разработки (т.е. разработка остановится на одном из этапов жизненного цикла). Решение в этом случае имеет описывается формулой (42)

$$x = \frac{1}{2} - \sqrt{d - \frac{1}{4}} \operatorname{tg} \left((t + C) \sqrt{d - \frac{1}{4}} \right). \quad (42)$$

Можно сделать вывод, что чем больше разница между $\varepsilon(t)$ и $C(G(t))$, тем вероятнее остановка роста готовности.

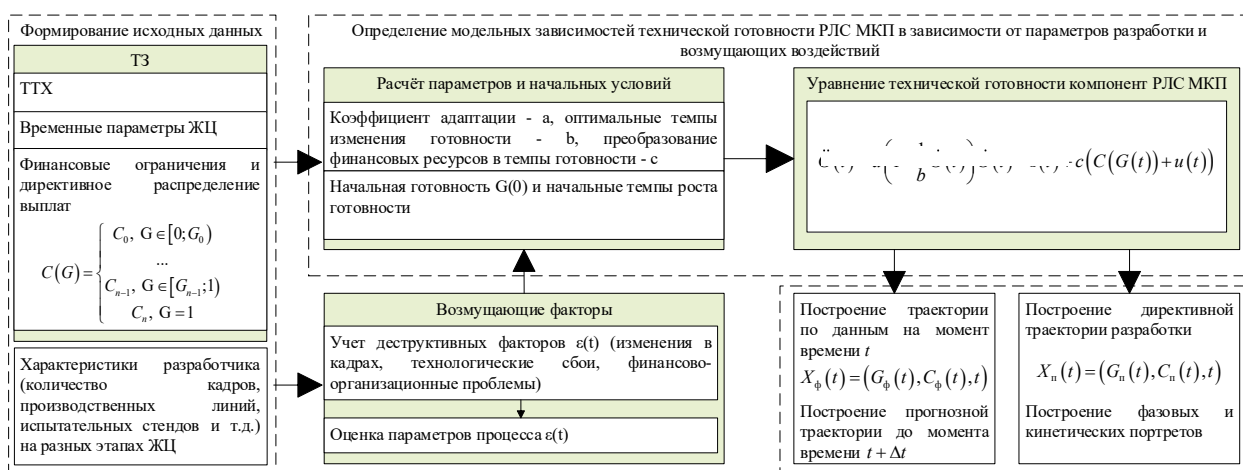
2.6 Структурно-логическая схема модели разработки РЛС

Структурно-логическая схема модели разработки РЛС представлена на рисунке 1.

Моделирование процесса разработки РЛС в пространстве «готовность – бюджет – время» включает следующие этапы.

1) Формирование исходных данных.

На основе госконтракта, ведомости исполнения и нормативной документации требуемые значения показателей процесса разработки РЛС, временные параметры ЖЦ, а также характеристики разработчика-контрагента: количество производимых блоков, производственных линий, испытательных стендов, кадровый состав и другие ресурсы на разных этапах ЖЦ.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Структурно-логическая схема модели разработки РЛС

2) Оценка возмущающих факторов.

На основе анализа разработки РЛС унифицированного ряда оцениваются деструктивные факторы $\varepsilon(t)$: технологические

сбои, финансово-организационные проблемы, а также внешние воздействия.

3) Расчёт параметров модели и начальных условий.

На основе опыта разработки РЛС унифицированного ряда определяются коэффициент адаптации a , оптимальные темпы изменения готовности b , коэффициент преобразования финансовых ресурсов в темпы готовности c , начальная готовность $G(0)$ и начальная скорость роста готовности $\dot{G}(0)$.

4) Построение уравнения технической готовности (22).

5) Расчёт директивной (плановой) траектории.

На этапе инициализации проекта, используя исходные данные и параметры модели, строится директивная траектория по формуле (43)

$$X_{\pi}(t) = (G_{\pi}(t), C_{\pi}(t)), \quad (43)$$

которая задаёт целевые показатели готовности и бюджета во времени.

6) Построение текущего состояния и прогнозной траектории.

На основе данных на момент времени t определяется фактическое состояние процесса разработка РЛС по формуле (44) и его прогноз

$$X_{\phi}(t) = (G_{\phi}(t), C_{\phi}(t)). \quad (44)$$

7) Оценка текущих рисков проекта.

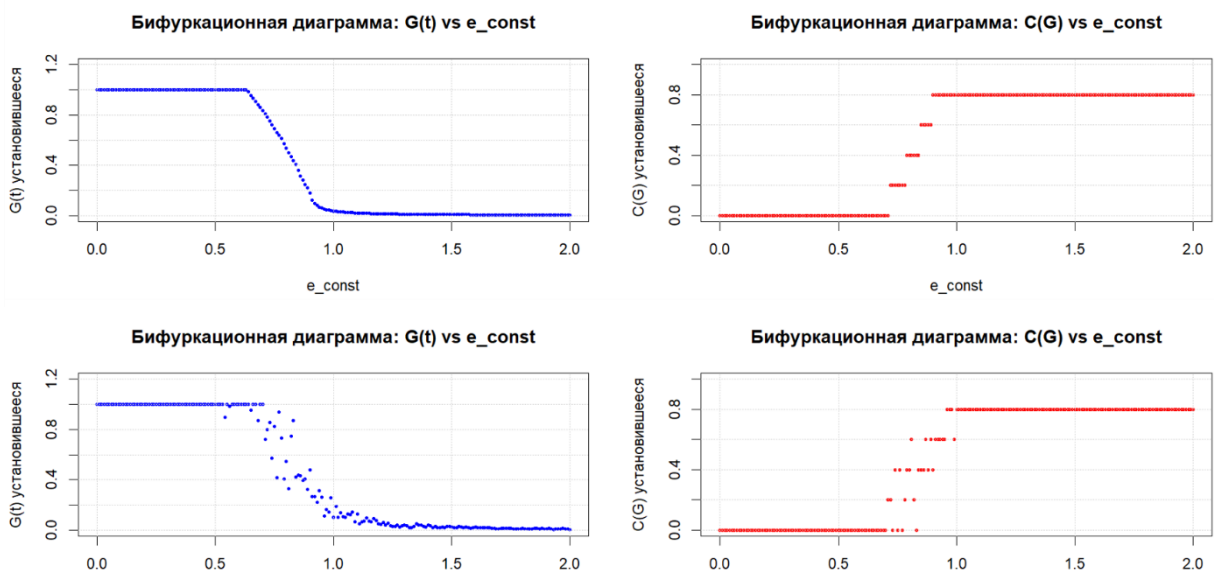
Путём сравнения фактической и прогнозной траекторий с директивной осуществляется количественная оценка рисков (вероятность срыва сроков, отклонения), что создаёт основу для принятия корректирующих управленческих решений. Данный пункт раскрывается подробнее в главе 3.

Таким образом, процесс разработки РЛС формализован в виде фазовой (готовность – бюджет) и кинетической (готовность – бюджет – время) траекторий, описываемых системой (22). Это позволяет оценивать динамику

процесса разработки РЛС и дает возможность определить зоне допустимых отклонений или рисков – области в фазовом пространстве и кинетическом портрете, внутри которых сохраняется возможность успешного завершения разработки РЛС в установленные сроки и в рамках выделенного бюджета.

2.7 Влияние стохастических возмущений на уровень готовности

Параметр возмущений $\varepsilon(t)$ оказывает существенное влияние на динамику показателей разработки, что показывает рисунок 2.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – График конечных состояний G и C в зависимости от $\varepsilon(t)$, верхние графики демонстрируют поведение системы, когда $\varepsilon(t)$ – постоянная величина, нижние – когда $\varepsilon(t)$ случайный процесс

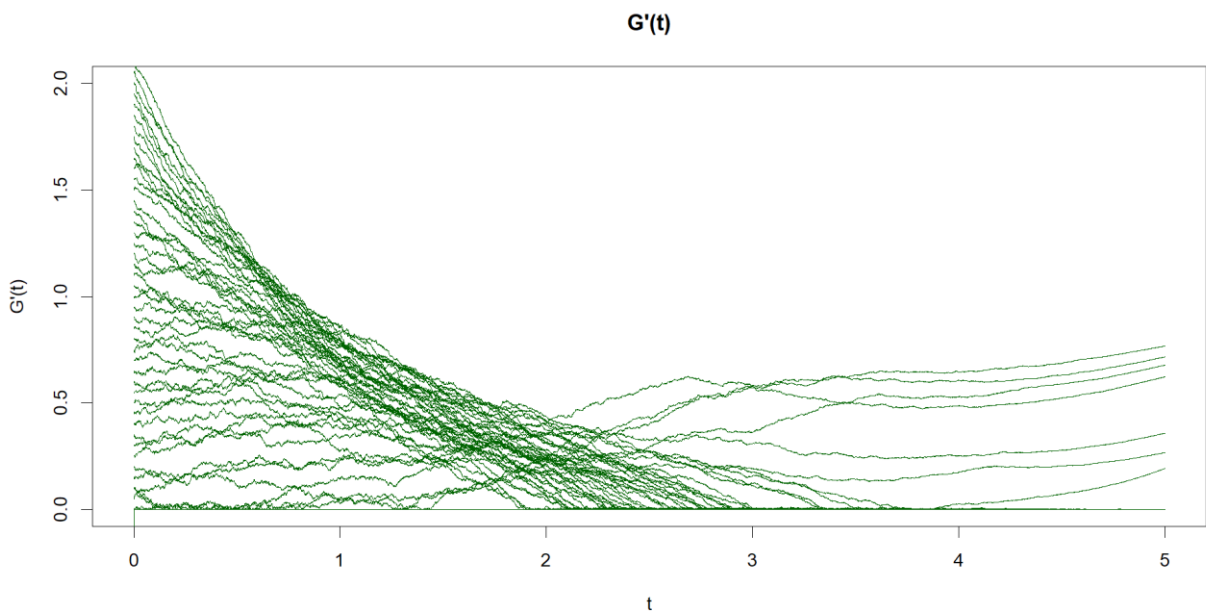
На кинетических портретах наблюдается следующее бифуркационное поведение системы (типичное для динамических систем [14]) на рисунке 2:

- при значениях ε ниже определенного порога траектории сохраняют устойчивый характер с положительной скоростью роста (т.е. производная устремляется к асимптоте);
- если математическое ожидание ε больше определенного порога

система переходит в качественно иное состояние, при котором $\dot{G}(t)$ быстро падает до нулевого значения.

При малых возмущениях траектории сходятся к состоянию завершённой разработки. Значительные возмущения переводят систему в состояние, при котором оказывается высокой вероятностью срыва сроков. Данный анализ обосновывает необходимость оперативного управления параметром $u(t)$ для компенсации возмущений и удержания системы в целевой области.

На кинетических портретах: рисунок 3 и рисунок 4, отображающих динамику переменной $G(t)$, наблюдается следующий качественный сценарий.



Источник: составлено автором.
Рисунок 3 – Кинетический портрет \dot{G}

Начальная стадия процесса ($t \ll T$) или этап проектирования.

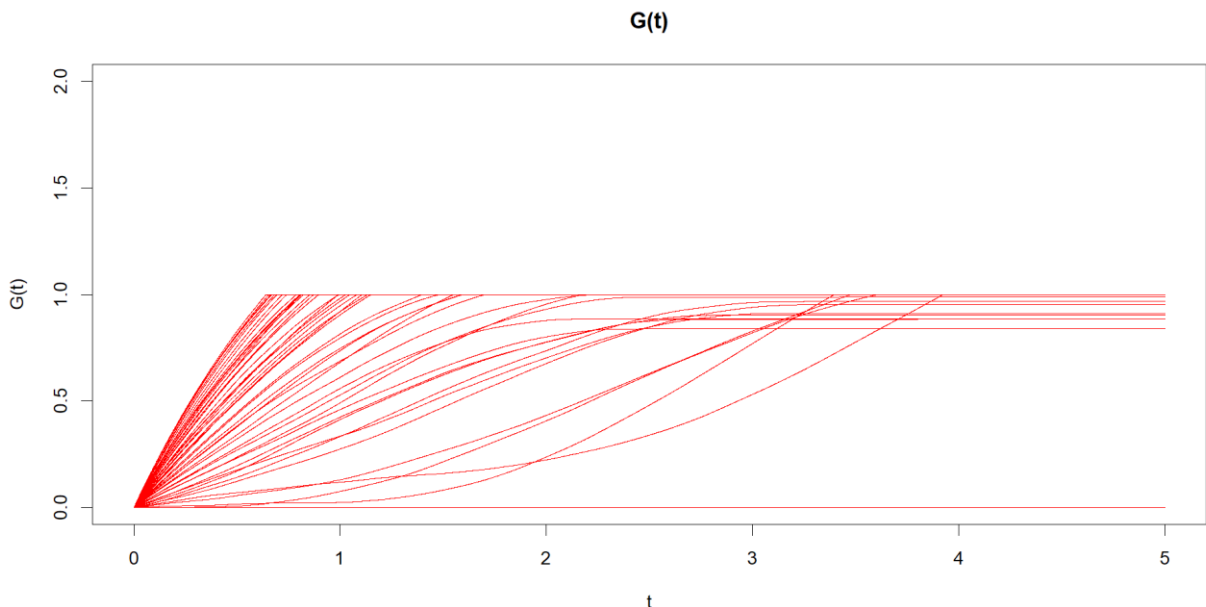
Параметры неучтенных факторов существенны. Система демонстрирует стохастическое поведение, аналогичное ранее исследованному случаю со стационарным шумом. Траектории $G(t)$ проявляют значительную волатильность.

Промежуточная стадия ($0 < t < T$) или этап изготовления.

Амплитуда случайных воздействий затухает. Детерминированная составляющая уравнения, определяемая частью $(1 - \dot{G}(t))\dot{G}(t) + C(G(t))$, начинает преобладать. Флуктуации траекторий $G(t)$ затухают, и их поведение становится гладким и предсказуемым.

Финальная стадия ($t \approx T$) или этап испытаний.

Неучтенные факторы пренебрежимо малы. Система выходит на детерминированный режим, становится проще прогнозировать результат разработки.



Источник: составлено автором.
Рисунок 4 – Кинетический портрет G

Выводы по главе 2.

Полученные результаты в главе:

1) разработана оригинальная математическая модель, в которой процесс разработки РЛС представлен в виде траектории динамической системы в пространстве состояний «техническая готовность компонентов РЛС – бюджет – время». Уравнения, описывающие динамическую систему, содержат компоненты позволяющие учесть неопределенность данных об

изменении готовности компонентов РЛС и возможность адаптивного финансирования;

2) введены показатели риска, отражающие меру отклонения фактических частных показателей: по готовности $R_r(t)$, календарному графику $R_k(t)$ и бюджету $R_b(t)$ разработки РЛС от плановых значений в текущий момент времени.

Глава 3

Методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ

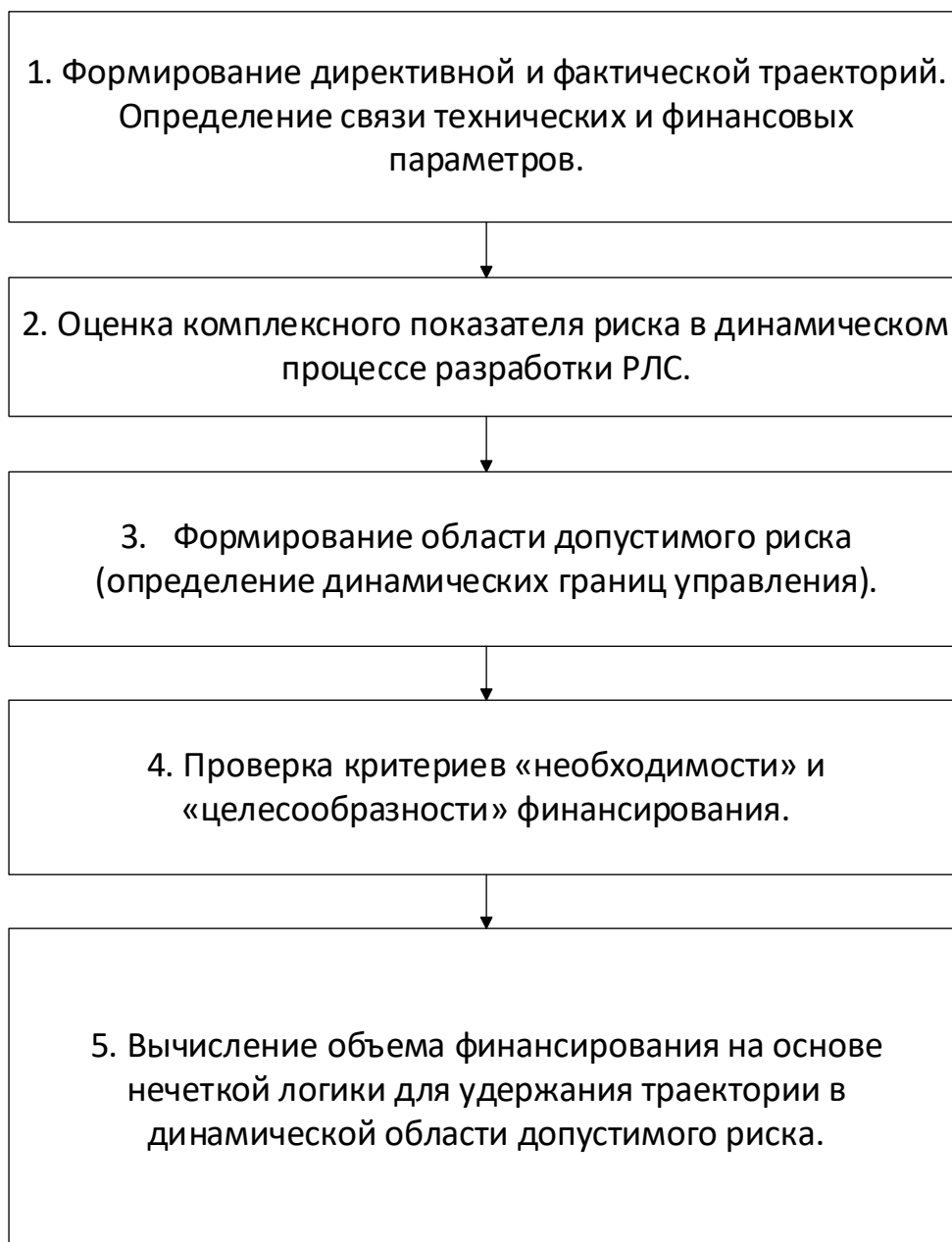
3.1 Общее описание методики

Классическая схема финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (далее – НИОКР) [64] предусматривает фиксированный аванс и жесткую привязку выделения средств к этапности работ. В диссертации рассматривается адаптивное финансирование, при котором изменение объема, момента и условий направления средств основному исполнителю работ и контрагентам зависит от фактического состояния разработки и реализуется по принципу обратной связи. Момент и объем финансирования становятся функцией от траектории движения проекта в пространстве возможных состояний. В общей структуре управления проектом предполагается введение новых функциональных операций: построение траектории разработки РЛС в фазовом пространстве, формирование области допустимого риска [54], оценки комплексного риска разработки РЛС и адаптации параметров финансирования к текущему состоянию. Эти операции дополняют традиционный научно-методический аппарат, включающий, как правило, такие операции как планирование, оценка риска и принятие решений. [42; 27].

Основные операции методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ представлены на рисунке 5.

Методика включают следующие действия:

- 1) определение связи технических и финансовых параметров, оценка параметров возмущающих воздействий, построение директивной (плановой) и фактической траекторий разработки компонентов РЛС;
- 2) оценка показателя комплексного риска;

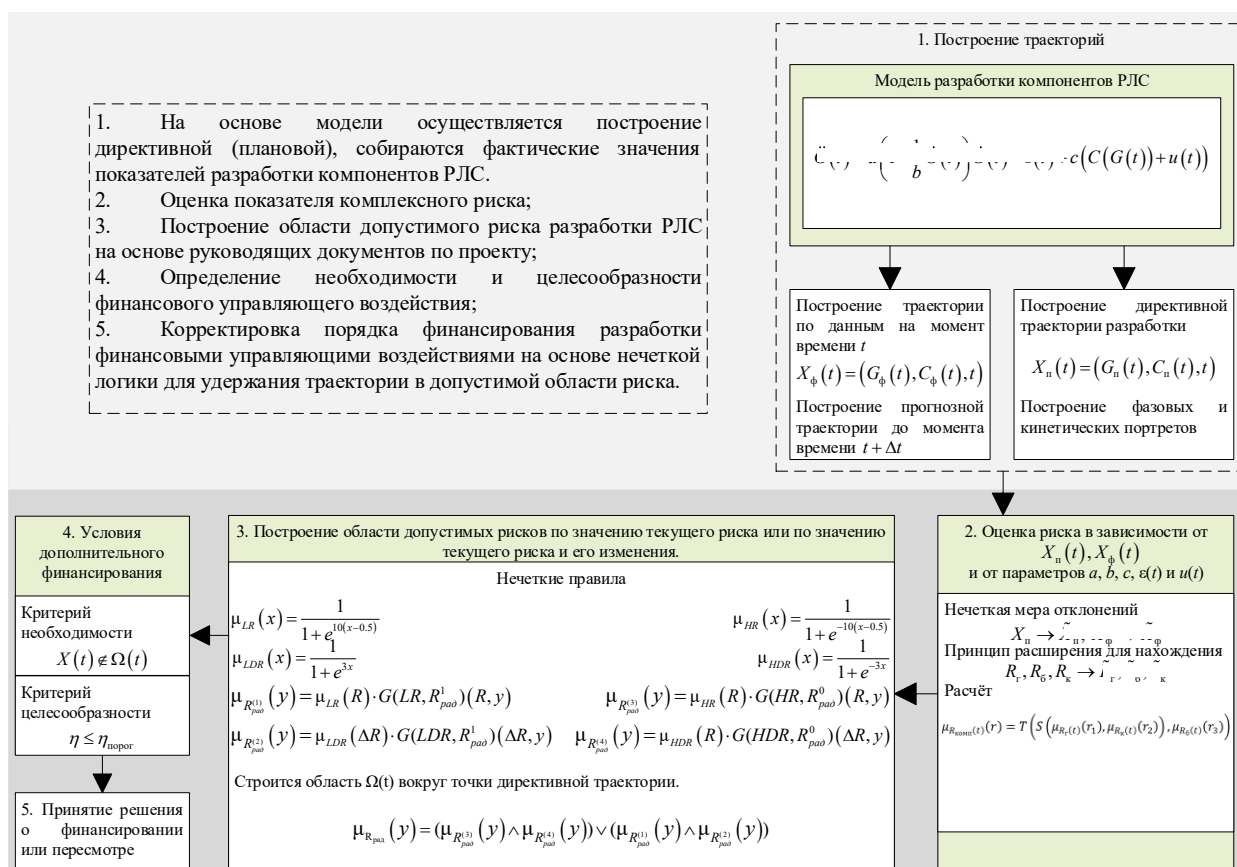


Источник: составлено автором.

Рисунок 5 – Основные действия методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ

- 3) построение области допустимого риска разработки РЛС на основе руководящих документов по проекту;
- 4) определение необходимости и целесообразности финансового управляющего воздействия;
- 5) корректировка порядка финансирования разработки финансовыми управляющими воздействиями для удержания траектории в допустимой области риска.

Более подробно структура методики представлена на рисунке 6.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6 – Выходные данные модели (директивная траектория и прогноз по фактическим данным) и методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ

Модель (22) задает 1 действие методики (правый верхний угол). В блоке 1 на рисунке 6 задается директивная (плановая) траектория разработки РЛС и собирается информация о фактических значениях показателей разработки. В результате этого на начальных этапах осуществляется построение директивной траектории развития разработки компонентов РЛС, что позволяет оценивать текущее состояние, а также прогнозировать значение технической готовности.

Выходным параметром модели является директивная (плановая) траектория X , представляющая собой множество параметризованное множество значений параметров G, C, t в пространстве \mathbb{R}^3 , которые поступают

в блок оценки риска, что показано на рисунке 6 в блоке 2, в качестве эталонных для сравнения.

Вторая операция позволяет оценивать риск на основе меры отклонений на основе аппарата теории вероятностей (в случае хорошей оценки параметров процесса $\varepsilon(t)$). Выходом этого блока является значение текущего риска.

Формирование области допустимых рисков, что показано в блоке 3, осуществляется на основе нечетких правил, суть которых заключается в определении размера области в зависимости от текущего значения риска и его изменения. Это позволяет учитывать динамику риска. Такой подход позволяет понимать, находится ли траектория в безопасной области, где дополнительное финансирование не требуется.

Определение момента и объема дополнительного финансирования осуществляется на основе двух последовательно применяемых критериев, как показывает блок 4: критерия необходимости и критерия целесообразности. Первый критерий отвечает за проверку вхождения текущей траектории разработки в область допустимого риска. Вторым критерием оценивается экономическая целесообразность финансовых вложений в случае, если траектория вышла за пределы допустимой области.

Блок 5 на рисунке 6 предоставляет рекомендации по адаптивному финансированию для удержания траектории в области допустимых рисков.

3.2 Построение динамической траектории разработки РЛС

Как показано в формуле (15) в главе 2, комплексный риск оценивается по параметрам.

С целью определения показателя комплексного риска и его динамики процесса создания РЛС представляется своей траекторией (непрерывно меняющейся параметрической кривой) в пространстве состояний, описывающей эволюцию ключевых параметров проекта (технической

готовности и затраченного бюджета) во времени под воздействием управляющих решений и возмущающих воздействий, как демонстрирует второй блок на рисунке 6.

Для определения вектора параметров процесса разработки РЛС в момент времени t представим их виде вектора (45)

$$X(t) = (G(t), C(t)), \quad (45)$$

где $X(t)$ – вектор состояния разработки;

$G(t)$ – текущий уровень технической готовности компонента РЛС;

$C(t)$ – совокупный объём задействованных в разработке финансовых ресурсов (руб.).

Динамика изменения параметров вектора $X(t)$ во времени описывается системой уравнений (22). Она задает траекторию хода разработки в фазовом пространстве «готовность – бюджет» (G, C) или на кинетическом портрете «готовность – бюджет – время» (G, C, t). Каждая точка траектории характеризует текущее состояние проекта по созданию РЛС – достигнутый уровень технической готовности, финансирование, текущий этап жизненного цикла, а её форма и направление движения отражают внутреннюю динамику выполнения работ и воздействие внешних факторов.

Пусть $X_{\text{п}}(t)$ соответствует директивной (плановой) траектории, построенной на основе уравнений (22), а $X_{\text{ф}}(t)$ – фактические значения, полученные в результате проведенных измерений реальной разработки.

Начало траектории совпадает с начальным состоянием проекта (46) в момент $t = 0$. Формула (45) преобразуется в формулу (46)

$$X(0) = (G(0), C(0)), \quad (46)$$

где $X(0)$ – начальный вектор состояния разработки;
 $G(0)$ – начальное значение технической готовности;
 $C(0)$ – начальное значение бюджета.

Начальное значение технической готовности РЛС $G(0)$ определяется начальными значениями технической готовности ее компонентов $G_i(0)$.

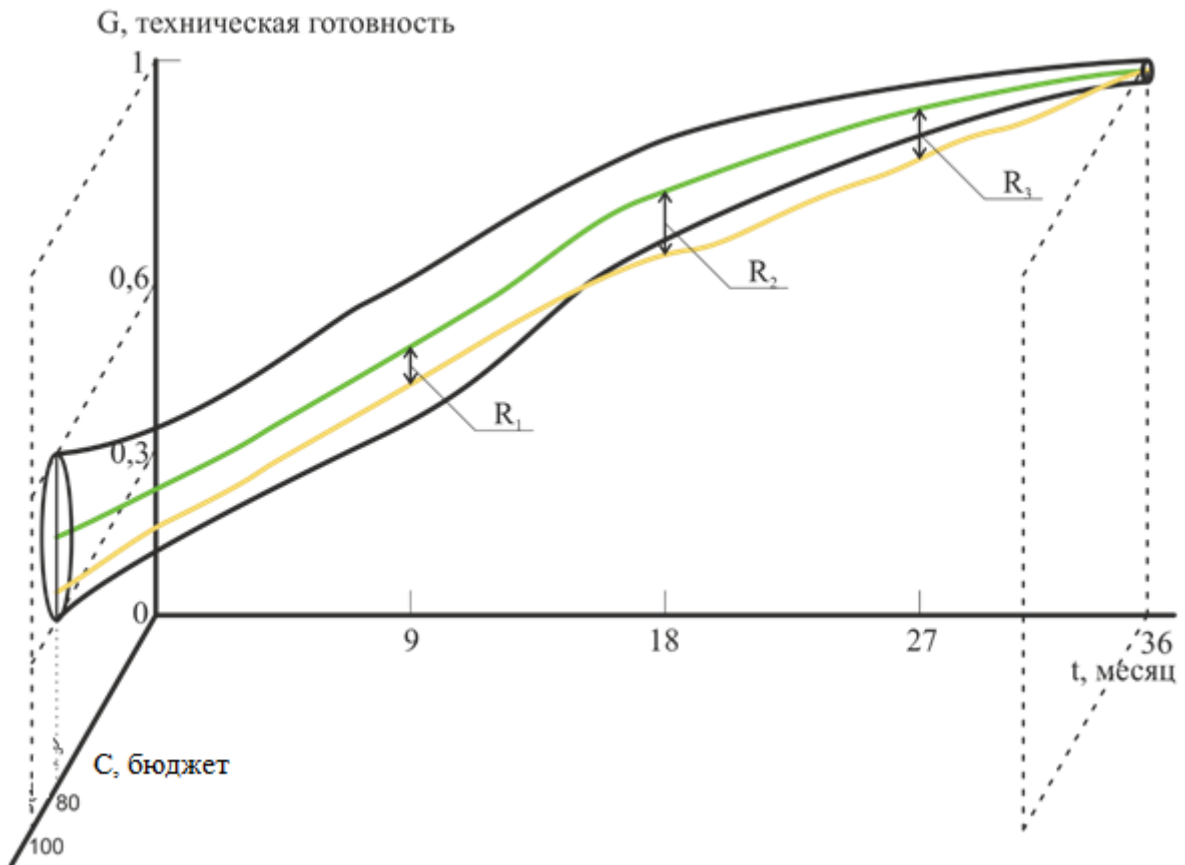
Следующий шаг – построение траектории $X(t)$ путем численного решения системы уравнений динамики (22). На каждом временном шаге вычисляются новые значения параметров, и формируется последовательность точек $X(t_0), X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$, которые образуют плановую траекторию разработки $X_{\text{п}}(t)$.

Данная траектория отображает переход состояния разработки от исходного к целевому, характеризующему завершение разработки РЛС, а ее динамика – изменение уровня технической готовности разработки РЛС при заданных ресурсных ограничениях и стохастических воздействиях. Это показано на схематичном изображении на рисунке 7.

Анализ опыта разработки РЛС различных поколений позволил определить следующие закономерности при построении динамической траектории при сценарии успешного завершения разработки [10]:

- на ранних этапах траектория характеризуется медленным ростом готовности G при высоких значениях риска $R(t)$;
- по мере накопления данных о ходе разработки значение риска снижается, и траектория стабилизируется и приближается к области допустимого риска;
- отклонения траектории (например, изгиб в сторону увеличения риска) свидетельствуют о воздействии возмущающих факторов (задержки поставок, ошибки при проектировании и др.). Большие отклонения могут привести к выходу фазовой траектории из допустимой области.

Таким образом, по результатам построения динамической траектории $X(t)$ формируется траектория, которая позволяет оценивать текущие значения комплексного риска разработки. По результатам сравнения полученных оценок со значением, заданным директивной траекторией проекта, принимается решение по адаптивному финансированию.



Источник: составлено автором.

Рисунок 7 – Схематичное изображение динамической траектории $X(t)$ в пространстве (G, C, t)

3.3 Оценка комплексного риска разработки РЛС

Определим подробнее показатель комплексного риска (15).

Введём следующие обозначения, характеризующие состояние разработки в момент времени t (данные показатели подробно рассмотрены в параграфе 2.3):

$G_{\text{п}}(t)$ – плановая техническая готовность;

$G_{\phi}(t)$ – фактическая техническая готовность;

$T_{\phi}(t)$ – затраченное на текущую готовность время;

$T_{\pi}(t)$ – плановое время текущую готовность;

$C_{\phi}(t)$ – фактическое значение бюджета;

$C_{\pi}(t)$ – планируемое значение бюджета.

Указанные показатели являются исходными для расчёта частных рисков: риска по готовности $R_{\Gamma}(t)$, календарного риска $R_{\text{кл}}(t)$ и бюджетного риска $R_{\text{б}}(t)$, которые количественно отражают отклонение фактической траектории от директивной в соответствующей области.

Для вычисления комплексного риска проекта используется аппарат нечеткой логики, позволяющий агрегировать разнородные показатели отклонений в условиях неопределенности исходных данных. Суть подхода заключается в оценке степени отклонений фактических показателей от плановых. Каждый из частных рисков: по готовности $R_{\Gamma}(t)$, календарному графику $R_{\text{кл}}(t)$ и бюджету $R_{\text{б}}(t)$ – количественно отражает это отклонение в своей области. Чем сильнее фактическая траектория отклоняется от плановой, тем выше будут значения показателей риска, что сигнализирует об увеличении угрозы срыва сроков достижения целевой готовности. В случае такого сигнала под угрозой срыва находится вся разработка.

Для реализации «мягкого» подхода к оценке комплексного риска проводится фаззификация численных значений показателей. Фаззификация позволяет существенно снизить чувствительность оценки риска к кратковременным возмущающим воздействиям. Благодаря использованию функций принадлежности резкие, но непродолжительные скачки показателей (например, вызванные временными сбоями в поставках или оперативными корректировками) не приводят к необоснованному росту оценки риска, поскольку такая оценка ориентируется на степень соответствия значений нечетким множествам, а не на их точные величины. В результате достигается

устойчивость вычислений к волатильности исходных данных, что повышает достоверность мониторинга состояния разработки РЛС.

В процессе фаззификации показатели $G_n(t)$, $G_\phi(t)$, $T_3(t)$, $T_n(t)$, $C_\phi(t)$, $C_n(t)$ преобразуются в специфические нечеткие числа [17; 52].

Для всех показателей вычисляется степень принадлежности исходного значения соответствующим нечетким множествам.

Для используемых нечётких множеств будем использовать функции принадлежности, отображенные в формуле (47)

$$\mu_X(x) = e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (47)$$

Последовательное применение арифметических операций к нечётким числам может привести к неоправданному увеличению нечёткости результата. В результате оценка комплексного риска, может стать излишне консервативной и потерять информативность. С учетом этого для выполнения преобразований в диссертации использован универсальный принцип обобщения Л. Заде [78]. При этом неопределённость исходных данных трансформируется в неопределённость результата напрямую без серии промежуточных искажений. Таким образом, принцип обобщения обеспечивает более точное, и корректное агрегирование информации в условиях неопределенности, что критически важно для получения адекватных прогнозных оценок [67]. Методы нечёткой интегральной оценки риска, успешно применяемые в долгосрочных проектах, описаны в [69; 73].

В соответствии с принципом общения Заде в формуле (48) значение функции $z = f(x, y)$ для нечетких аргументов X и Y есть нечеткое множество Z с функцией принадлежности

$$\mu_Z(z) = \underset{(x,y)=z}{S} [T(\mu_X(x), \mu_Y(y))], \quad (48)$$

где S – t -конорма (обобщенное объединение);
 T – t -норма (обобщенное пересечение).

В частности, если в качестве t -конорма взять операцию максимума, а в качестве t -нормы – произведение, формула (48) преобразуется в формулу (49)

$$\mu_Z(z) = \max_{x,y:f(x,y)=z} [\mu_X(x) \cdot \mu_Y(y)]. \quad (49)$$

Определим нечеткие значения частных показателей риска $R_\Gamma(t)$, $R_{\text{ккл}}(t)$ и $R_\delta(t)$ формулами (50) - (52)

$$\mu_{R_\Gamma}(r_\Gamma) = \max_{x,y:R_\Gamma(x,y)=r_\Gamma} [\mu_{G_\Pi}(x), \mu_{G_\Phi}(y)], \quad (50)$$

$$\mu_{R_{\text{ккл}}}(r_{\text{ккл}}) = \max_{x,y:R_{\text{ккл}}(x,y)=r_{\text{ккл}}} [\mu_{T_\Pi}(x), \mu_{T_\Phi}(y)], \quad (51)$$

$$\mu_{R_\delta}(r_\delta) = \max_{x,y:R_\delta(x,y)=z} [\mu_{G_\Pi}(x), \mu_{G_\Phi}(y)]. \quad (52)$$

Функцию принадлежности показателя комплексного риска $R_{\text{к}}(t)$ определим формулой (53)

$$\mu_{R_{\text{комп}}(t)}(r) = T \left(S \left(\mu_{R_\Gamma(t)}(r_1), \mu_{R_{\text{ккл}}(t)}(r_2) \right), \mu_{R_\delta(t)}(r_3) \right). \quad (53)$$

Далее проводим дефаззификацию (преобразование в действительное число) $R_{\text{комп}}(t)$ методом центра тяжести, результат будет являться

Четкая итоговая оценка комплексного риска получается дефаззификацией показателя $R_{\text{комп}}(t)$.

Комплексный риск рассчитывается на каждом шаге моделирования, что обеспечивает оперативный мониторинг и создает основу для адаптивного управления.

Полученные значения комплексного риска позволяют судить о текущем состоянии разработки.

3.4 Построение области допустимого риска в фазовом пространстве

Для принятия решения о необходимости финансирования формулируются критерии, показывающие, когда отклонение траектории становится критическим. Для этого строится область допустимого риска (блок 3 на рисунке б), выход за пределы которой служит сигналом для активации механизма адаптивного управления.

В соответствии с основами параметрического синтеза сложных динамических систем [29], представление области допустимых состояний в фазовом пространстве в виде ограниченных областей является действенной мерой для достижения поставленной в диссертации цели. Построение «области неопределенности», позволяет учесть корреляционные связи между разнородными параметрами системы, которыми в рамках данной методики являются уровни технической готовности $G(t)$ и объем финансирования $C(t)$.

Как отмечено в [29], при контроле состояния системы по нескольким коррелированным параметрам, назначение независимых допусков (интервалов) на каждый параметр в отдельности ведет к снижению достоверности контроля. Вместо интервального подхода в диссертации используется подход, основанный на построении области допустимых состояний. Множество допустимых состояний системы формируется в виде

области в n -мерном пространстве параметров. В контексте диссертационной работы таким пространством является пространство проекта (G, C, t) , а областью допустимых состояний – область допустимого риска $\Omega(t)$.

В развитие подходов к анализу неопределенности, изложенных в работе [29], в настоящей методике области неопределенности придается динамический характер. Границы области допустимого риска технически сложного объекта не являются статичными и могут изменяться при изменении внутренних и внешних условий. По мере выполнения проекта область допустимого риска $\Omega(t)$ сужается. На начальных этапах проекта границы области устанавливаются более широкими, что обусловлено объективно существующими значительными вариациями параметров. К моменту завершения разработки область сужается, отражая закономерное уменьшение диапазона возможных отклонений.

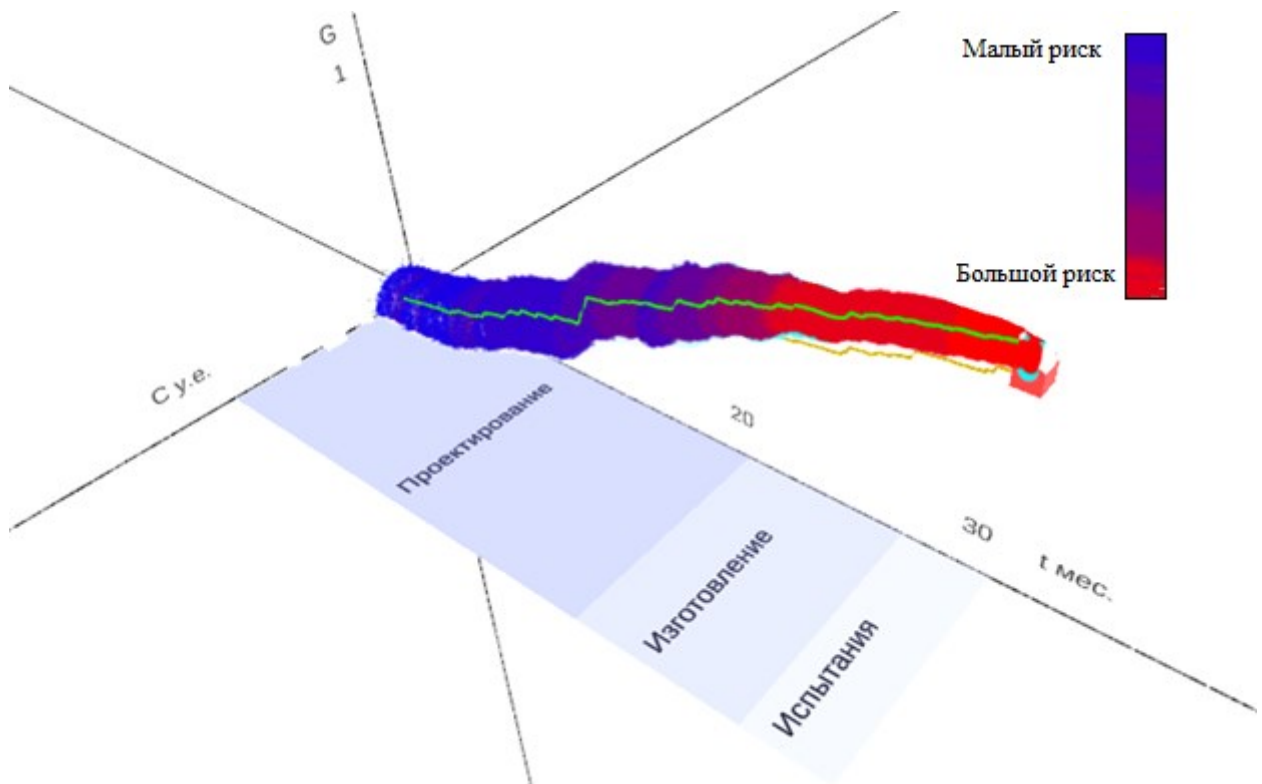
Таким образом, введение в методику операции построения области допустимого риска на основе научно-методического аппарата «области неопределенности» позволяет корректно учесть взаимное влияние технических и финансовых параметров проекта и обеспечивает аналитическую основу для контроля траектории разработки.

Будем полагать, что параметры области допустимого риска формируются на этапе разработки модели процесса создания РЛС (основании руководящих документов по проекту: (ведомости исполнения, частных технических заданий и др.) и директивно утверждённых допусков на каждом этапе жизненного цикла разработки РЛС. Вариант построения области показан на рисунке 8.

Для формирования области допустимого риска сформулированы правила, задающие размер области. Такой подход позволяет учитывать динамику риска, когда нахождение классической вероятностной меры затруднено. В подобной ситуации использование мягких вычислений целесообразно и обосновано, так как нечеткие правила являются

универсальным аппроксиматором [11]. Предложенный в диссертации подход позволяет аппроксимировать функцию оценки состояния разработки, определить которую явным образом не представляется возможным.

Обоснованность такого подхода обусловлена результатами, содержащимися в [63; 65; 70; 72; 74; 77].



Источник: составлено автором в разработанном аппаратно-программном комплексе в Unity3d.

Рисунок 8 – Вариант построения области допустимого риска для траектории хода разработки РЛС

Будем полагать, что параметры функций принадлежности в правилах для области допустимого риска формируются на начальных этапах на основании руководящих документов по проекту (ведомости исполнения, частных технических заданий и др.) и директивно утверждённых допусков на каждом этапе жизненного цикла разработки РЛС.

С помощью правил, получающих на вход значение риска и его изменение, вычисляется радиус области допустимого риска.

Найденное значение используется с поправочным коэффициентом $s(t)$, отражающим сужение области допустимого риска во времени. Коэффициент сжатия $s(t)$, убывающий от 1 в начале проекта ($t = 0$) до s_{min} в момент планового завершения проекта ($t = T_p$).

Область формируется и динамически сужается по детерминированному закону в момент времени t :

Данный подход обеспечивает предсказуемость границ допустимого риска на всем протяжении проекта.

В условиях большой неопределенности волатильность оценки риска может быть весьма существенной, что естественным образом сказывается и на его динамике. Поэтому необходимо адекватно учитывать как общие положения об области рисков (например – уменьшение области к концу срока разработки), так и текущее изменение показателей подверженных влиянию возмущающих факторов. Вторым этапом защиты от «внезапных» скачков при изменении показателей служит применение аппарата нечеткой логики, позволяющего формализовать экспертные знания, аппроксимировать сложные нелинейные зависимости и сглаживать влияние кратковременных флуктуаций.

Для обеспечения дифференцированного подхода к определению границ области допустимого риска в зависимости от текущей рискованной обстановки формируются нечеткие правила следующего вида:

- «при малом значении риска либо отрицательной динамике его изменения радиус области большой»;
- «при высоком уровне риска либо положительной динамике его изменения радиус области мал».

Для реализации операции построения области допустимого риска, как показано в блоке 3 на рисунке 6, сформулируем лингвистические правила, определяющие зависимость радиуса неопределенности от значений риска и

его динамики. Данные правила служат основой для последующей нечеткой аппроксимации границ области:

- 1) «если риск мал, то радиус большой»;
- 2) «если изменение риска отрицательное, то радиус большой»;
- 3) «если риск большой, то радиус маленький»;
- 4) «если изменение риска положительное, то радиус маленький».

Сформулированные правила выступают в качестве базы знаний нечеткого вывода, на основе которой для каждого текущего состояния разработки (значений $R(t)$ и $\Delta R(t)$) определяется радиус области допустимого риска. Тем самым реализуется адаптивное формирование границ области в зависимости от складывающейся рискованной обстановки, что и составляет содержание второго действия предлагаемой методики.

С помощью приведенных ниже правил по показателю риска $R = R(t)$ строится нечеткое множество $R_{\text{рад}}(t)$ – нечеткий радиус области допустимого риска. Нечеткое множество $R_{\text{рад}}(t)$ определяет в момент времени t сечение нечеткой «трубки», внутри которой проходит директивная траектория.

Фаззифицируем риск $R(t)$ и его изменение $\Delta R(t)$, где функции принадлежности построены на основе гауссовой функции (47). Пусть R – фаззифицированное значение $R(t)$, $\Delta R(t)$ – фаззифицированное значение изменения $R(t)$, а $R_{\text{рад}}$ – нечеткий радиус области допустимого риска.

В нечетких правилах будем использовать следующие операторы

- 1) импликация Гогена [11; 17] (54)

$$a \xrightarrow{G} b = \begin{cases} 1, & a = 0 \\ \min\left(\frac{b}{a}, 1\right), & a \neq 0 \end{cases}; \quad (54)$$

- 2) дизъюнкция (55)

$$a \vee b = \max(a, b); \quad (55)$$

3) конъюнкция (56)

$$a \wedge b = a \cdot b. \quad (56)$$

Зададим нечеткие правила подобно тому, как это сделано в [53].

Правило 1.

Вербальной переменной «Риск мал» соответствует нечеткое множество LR с сигмоидной функцией принадлежности (57)

$$\mu_{LR}(x) = \frac{1}{1 + e^{10(x-0,5)}}. \quad (57)$$

Переменной заключения «радиус большой» - нечеткое число $R_{\text{рад}}^1$ с функцией принадлежности (58)

$$\mu_{R_{\text{рад}}^1}(x) = e^{-(x-1)^2}. \quad (58)$$

Оценка импликации вычисляется по формуле (59)

$$G(LR, R_{\text{рад}}^1)(x, y) = \mu_{LR}(x) \xrightarrow{G} \mu_{R_{\text{рад}}^1}(y). \quad (59)$$

Обобщенное правило заключения (modus ponens) позволяет представить $R_{\text{рад}}$ как нечеткое множество с функцией принадлежности (60)

$$\mu_{R_{\text{рад}}^{(1)}}(y) = \mu_{LR}(R) \cdot G(LR, R_{\text{рад}}^1)(R, y). \quad (60)$$

Правило 2.

Вербальной переменной «изменение риска отрицательное» соответствует нечеткое множество LDR с функцией принадлежности (61)

$$\mu_{LDR}(x) = \frac{1}{1+e^{3x}}. \quad (61)$$

По аналогии с формулой (60) получаем формулу (62)

$$\mu_{R_{\text{рад}}^{(2)}}(y) = \mu_{LDR}(\Delta R) \cdot G(LDR, R_{\text{рад}}^1)(\Delta R, y). \quad (62)$$

Правило 3.

Вербальная переменная «Риск большой» представлена нечетким множеством HR с функцией принадлежности (63)

$$\mu_{HR}(x) = \frac{1}{1 + e^{-10(x-0,5)}}. \quad (63)$$

Вербальная переменная «радиус маленький» - нечетким множеством $R_{\text{рад}}^0$ с функцией принадлежности (64)

$$\mu_{R_{\text{рад}}^0}(x) = e^{-x^2}. \quad (64)$$

Так же, как и в формуле (60), получаем формулу (65)

$$\mu_{R_{\text{рад}}^{(3)}}(y) = \mu_{HR}(R) \cdot G(HR, R_{\text{рад}}^0)(R, y). \quad (65)$$

Правило 4.

Для вербальной переменной «изменение риска большое» будем использовать нечеткое множество HDR с функцией принадлежности (66)

$$\mu_{LDR}(x) = \frac{1}{1 + e^{-3x}}. \quad (66)$$

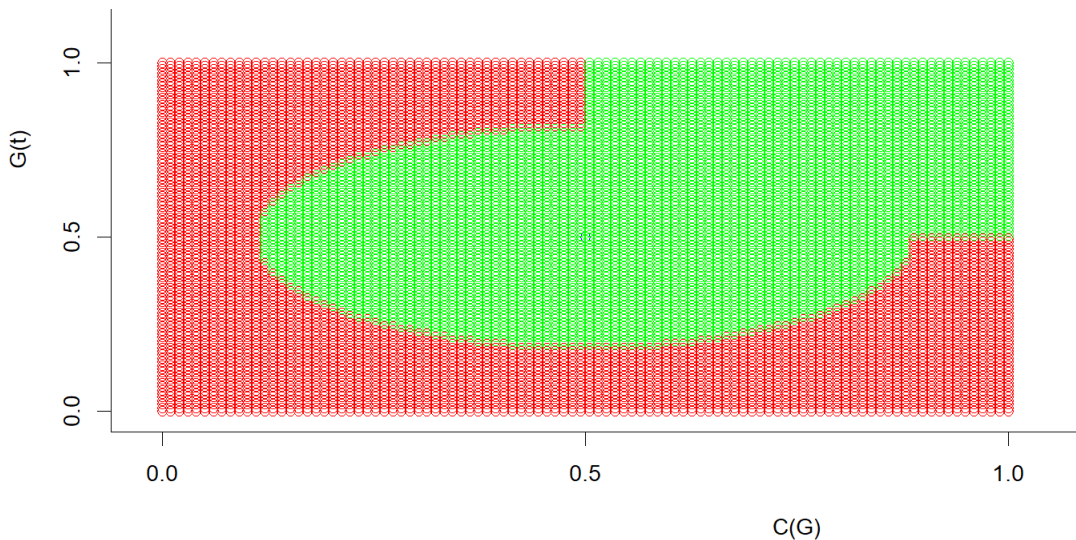
Соответственно образуется формула (67)

$$\mu_{R_{\text{рад}}}^{(4)}(y) = \mu_{HDR}(\Delta R) \cdot G(HDR, R_{\text{рад}}^0)(\Delta R, y). \quad (67)$$

Используя логические связки, получаем формулу (68)

$$\mu_{R_{\text{рад}}}(y) = \left(\mu_{R_{\text{рад}}}^{(3)}(y) \wedge \mu_{R_{\text{рад}}}^{(4)}(y) \right) \vee \left(\mu_{R_{\text{рад}}}^{(1)}(y) \wedge \mu_{R_{\text{рад}}}^{(2)}(y) \right). \quad (68)$$

Далее проводим дефаззификацию $R_{\text{рад}}$ методом центра тяжести и умножив результат на поправочный коэффициент $s(t)$, получаем радиус. В результате строится область как на рисунке 8 или на рисунке 9.



Источник: составлено автором.

Рисунок 9 – Схематичный срез области допустимого риска в фазовом пространстве ($G - C$)

Исходными данными для построения области допустимого риска являются директивная траектория $X_{\text{п}}(t)$ и фактическая траектория $X_{\text{ф}}(t)$.

Проект признается экономически нецелесообразным для дальнейшего инвестирования при выполнении одного из двух условий. Первое условие – невозможность возврата проекта в область допустимого риска при любом

прогнозируемом объеме дополнительного финансирования. Второе условие основано на оценке предельной эффективности выделяемых средств. Прекращение финансирования обосновывается снижением результативности, ниже критического порога, когда стоимость достижения единицы снижения риска становится несоразмерной ожидаемому полезному эффекту. Данный принцип обеспечивает рациональное прекращение ресурсоемких проектов с неблагоприятным прогнозом.

Таким образом, построенная область допустимого риска позволяет следить за ходом разработки с учетом директивно заданных ограничений. Выход траектории разработки за пределы области служит формальным сигналом о возрастающей вероятности срыва установленных сроков и требует активации механизма адаптивного финансирования, то есть осуществляется переход к блоку 4 на рисунке 6.

3.5 Условия дополнительного финансирования: критерии необходимости и целесообразности

В соответствии с пятью действиями предлагаемой методики после построения фазовой траектории (действие 1), оценки комплексного риска (действие 2) и определения области допустимого риска (действие 3) следующим, четвертым действием является проверка критериев принятия решения об адаптивном финансировании.

Принятие решения о вмешательстве в ход разработки разделим на два вида:

- дополнительное финансирование разработки компонентов РЛС;
- приостановка разработки компонентов РЛС и пересмотр разработки.

В контексте управления разработкой РЛС в условиях неопределённости и ограниченности ресурсов, решение о дополнительном финансировании

должна опираться на чёткие количественные критерии. В данном исследовании предложены два взаимосвязанных критерия. Они согласуются с принципами военно-экономического анализа, в частности, с подходом, изложенным в работе Н.В. Фирова по оценке целесообразности создания образцов вооружения и военной техники [57].

1) Критерий необходимости (Критерий активации управляющего воздействия). Данный критерий формализует условие, при котором текущее состояние проекта признаётся отклоняющимся от допустимого, что требует активации механизма корректирующего финансирования. Он является аналогом выхода контролируемых параметров за установленные границы "поля допуска" в технических системах.

Выход траектории из области допустимого риска сигнализирует о возникновении угрозы выполнению проекта в целом. Такая ситуация делает необходимым рассмотрение вопроса о выделении дополнительных средств для компенсации негативных факторов и возврата траектории проекта в безопасную зону.

2) Критерий целесообразности (критерий экономической эффективности инвестиций). Срабатывание критерия необходимости указывает на потребность во вмешательстве, но не гарантирует экономическую оправданность вмешательства. Критерий целесообразности оценивает, приведёт ли планируемое финансовое вложение к приемлемому результату с точки зрения военно-экономической эффективности.

Критерий целесообразности позволяет оценить, являются ли потенциальные затраты на стабилизацию проекта соразмерными достигаемому снижению риска или иному полезному эффекту. Он призван предотвратить нерациональное вливание средств в заведомо проблемные или бесперспективные с экономической точки зрения направления работ.

Дальнейшие вложения нецелесообразны, когда предельная эффективность дополнительных инвестиций (снижение риска на единицу затраченных средств) падает ниже критического уровня.

Предельная эффективность определяется по формуле (69)

$$\eta = \frac{\Delta R}{\Delta u(t)}, \quad (69)$$

является непостоянной во времени величиной. В частности, на ранних этапах жизненного цикла РЛС (проектирование) эффективность дополнительного финансирования подвержена высокой неопределённостью. По мере перехода к этапам изготовления и испытаний РЛС, когда структура работ и потенциальные проблемы становятся более определёнными, предельная эффективность инвестиций может быть более прогнозируемой. Предельная эффективность инвестиций может снижаться по мере развития проекта и исчерпания резервов, а может и расти, если готовность компонентов РЛС высока.

Пороговое значение $\eta_{\text{крит}}$ определяют границу при выборе решения. Если $\eta(t) \leq \eta_{\text{крит}}$, то финансирование целесообразно. Если $\eta(t) > \eta_{\text{крит}}$, то необходимо пересмотреть проект.

Механизм адаптивного финансирования активируется только при одновременном выполнении критерия необходимости (риск превысил порог) и критерия целесообразности (инвестиции экономически оправданы).

Переход к оптимизации финансовых выплат происходит в момент времени t , если траекторию возможно вернуть в область допустимых рисков и это целесообразно. То есть формула (6) дополняется условием (70)

$$\exists u(t): \left(X_{\phi}(t + \Delta t) \in \Omega(t + \Delta t) \right) \wedge \left(\forall t \in [t; t + \Delta t]: \eta(t) \leq \eta_{\text{крит}} \right). \quad (70)$$

Такой двухэтапный подход позволяет перевести процесс принятия решений о финансировании в плоскость расчётных показателей. Это минимизирует субъективизм и ориентирует на принципы рационального использования ресурсов, что особенно критично для долгосрочных и капиталоемких проектов.

3.6 Принятие решения о финансировании или пересмотре разработки компонентов РЛС

Определение интенсивности финансового управляющего воздействия важно. На основе количественных оценок комплексного риска ситуативно формируется качественное управленческое решение. Для реализации данной задачи применяется математический аппарат нечеткой логики, позволяющий эффективно работать с качественными характеристиками и экспертной информацией в условиях неполной определенности исходных данных [11; 17].

Приведем условия, при выполнении которых выделение дополнительных финансовых средств целесообразно. Если показатели допустимого риска задают точку, находящуюся в области допустимого риска в пространстве (G, C, t) , разработка РЛС идет нормально. Выход из области допустимого риска означает повышенный риск срыва сроков разработки. В таком случае требуется принять решение о корректировке хода разработки РЛС.

Принцип остановки проекта формулируется следующим образом: проект подлежит пересмотру или прекращению, когда для удержания его в допустимой зоне риска требуются такие дополнительные вложения, что предельная эффективность η опускается ниже критического уровня $\eta_{\text{крит}}$. Этот принцип обеспечивает защиту от бесконечного вливания средств в заведомо нереализуемую разработку.

Основой для принятия решения служит показатель отклонения комплексного риска $R(t)$, введенный в (53). Для принятия обоснованного решения недостаточно знать лишь текущее значение отклонения реальной фазовой траектории проекта от директивной. Необходимо учитывать также скорость его изменения. Поэтому в качестве входных параметров нечеткого контроллера используются два показателя: текущее значение комплексного риска $R(t)$ и скорость его изменения $\Delta R(t)/\Delta t$.

Задачу поиска объема оптимального финансирования можно сформулировать следующим образом (5-6).

Опираясь на свойство универсальной аппроксимации, можно заменить неизвестную аналитическую функцию управления набором нечётких продукционных правил, которые с достаточной точностью воспроизводят требуемую стратегию финансового воздействия. Это позволяет использовать экспертные знания о поведении проекта в различных ситуациях и формализовать их в виде нечёткой базы знаний, обеспечивающей принятие решений в условиях неопределённости. Зададим далее правила, которые находят приемлемое управление.

Как было показано в параграфе 3.4, нечёткие правила позволяют строить область допустимого риска. Поскольку выход траектории из области допустимого риска служит индикатором необходимости корректирующего воздействия, тот же механизм используется для формирования управляющего сигнала – объёма дополнительного финансирования.

Рассмотрим два подхода к такому управлению.

3) Как только траектория разработки покидает область допустимого риска, инициируется выделение заранее фиксированного объёма средств (константы). Такой способ прост в реализации, однако не учитывает ни величину отклонения, ни динамику процесса, что может приводить либо к избыточному, либо к недостаточному финансированию.

4) Правила, которые ранее использовались для определения радиуса

области, теперь применяются для непосредственного вычисления объёма финансирования. Структура правил сохраняется, но заключением становится не геометрический параметр области, а лингвистическая переменная «объём дополнительных средств». Срабатывание правил происходит автоматически при фиксации выхода траектории из допустимой области, а итоговое значение финансирования получается путём дефаззификации. Это позволяет гибко реагировать на степень и скорость отклонения, связывая величину управляющего воздействия с текущей рискованной обстановкой. Подходы к нечёткому управлению проектами, сочетающие контроль освоенных объёмов и нечёткую логику, представлены в [79].

Сформулируем лингвистические правила для определения радиуса области допустимого риска:

- 1) «если риск мал, то управляющие воздействия малы»;
- 2) «если изменение риска отрицательное, то управляющие воздействия малы»;
- 3) «если риск большой, то управляющие воздействия большие»;
- 4) «если изменение риска положительное, то управляющие воздействия большие».

Используем такие же операции, как и в параграфе 3.4 для формулы (71)

$$\mu_U(y) = \left(\mu_{U^{(3)}}(y) \wedge \mu_{U^{(4)}}(y) \right) \vee \left(\mu_{U^{(1)}}(y) \wedge \mu_{U^{(2)}}(y) \right), \quad (71)$$

где $U, U^{(1)}, U^{(2)}, U^{(3)}, U^{(4)}$ – рассчитанные аналогично (57-68) объёмы дополнительных финансовых средств.

Выводы по главе 3.

Разработана методика адаптивного финансирования разработки РЛС, в которой на основе построения динамической траектории хода разработки РЛС производится оценка комплексного риска и формирование адаптивных финансовых воздействий. Следование этой методике позволяет удерживать

траекторию в области допустимого риска и, таким образом, обеспечивать на заданном уровне эффективность процесса разработки РЛС.

Для контроля состояния хода разработки РЛС по нескольким параметрам используется область допустимого риска, в которой множество допустимых состояний системы формируется в пространстве (G, C, t) .

Показано, что применение аппарата нечетких множеств позволяет эффективно сформировать набор решений по перераспределению средств между разрабатываемыми компонентами в условиях неопределенности.

Результаты экспериментальной проверки разработанной методики адаптивного финансирования приведены в главе 4.

Глава 4

Исследование эффективности методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ и рекомендации по ее практическому применению

Для проведения исследования эффективности предложенной методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования, а также для верификации адекватности разработанных моделей был создан специализированный программно-аппаратный комплекс (далее – ПАК). Данный комплекс решает ключевые задачи имитационного моделирования процесса разработки:

- он обеспечивает построение динамической траектории развития разработки компонентов РЛС на основе поступающих данных о технической готовности и бюджете;
- в его среде реализована визуализация области допустимого риска;
- ПАК позволяет вычислять порядок корректирующего финансирования в условиях неопределенности исходных данных.

4.1 Программно-аппаратный комплекс управления созданием РЛС

Цель разработки и последующего экспериментального исследования на созданном ПАК – показать, что предложенная методика способна обеспечить создание РЛС с требуемыми тактико-техническими характеристиками в рамках выделенного финансирования и директивных сроков разработки.

Для достижения поставленной цели снижения рисков создания РЛС комплекс решает следующие задачи:

- 1) моделирование динамики создания РЛС за счёт построения фазовых и кинетических траекторий процесса разработки ее компонентов;

2) расчет комплексного показателя риска разработки для оценки текущего состояния проекта в условиях неопределенности;

3) анализ положения траектории проекта относительно области допустимого риска, позволяющий:

- верифицировать критерии необходимости и целесообразности дополнительных финансовых вливаний;

- определять требуемый объем финансирования для возврата траектории проекта в допустимую зону;

- сравнивать эффективность предлагаемой методики адаптивного финансирования с существующими подходами;

4) наглядное представление поведения процесса разработки в двумерном и трехмерном пространствах, включая возможность интерактивного воздействия на параметры модели для исследования различных сценариев.

Для реализации указанного функционала ПАК в своём составе имеет следующие компоненты, что продемонстрировано на рисунке 10:

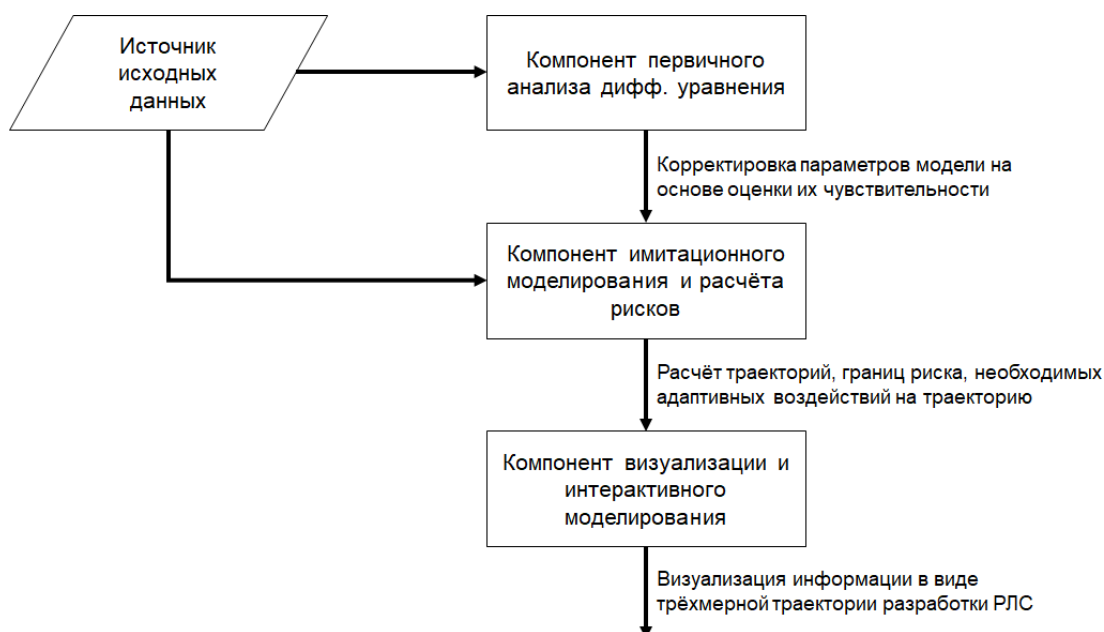
1) компонент первичного анализа дифференциальных уравнений. Анализ реализован в виде скрипта на языке R (среда разработки RStudio) и C# (среда разработки Microsoft Visual Studio) и позволяет оценивать чувствительность параметров и проводить предварительные расчеты;

2) компонент имитационного моделирования и расчета рисков, разработанный на языке C# в среде Microsoft Visual Studio. Блок включает в себя алгоритм реализации динамической модели и инструментарий для работы с нечеткими множествами. Для обеспечения гибкости и возможности создания специфических моделей мягких вычислений используется библиотека УрФУ [6] по работе с нечеткой логикой;

3) компонент визуализации и интерактивного моделирования, реализованный в среде разработки Unity3D с использованием языка C#. Блок обеспечивает:

- построение двумерных и трехмерных фазовых и кинетических портретов модели;
- отображение области допустимых рисков, рассчитанных в соответствии с предложенным научно-методическим аппаратом;
- визуализацию траектории процесса разработки РЛС;
- возможность программного и пользовательского воздействия на параметры модели (возмущающие воздействия, финансовые вмешательства) для интерактивного исследования сценариев «что, если». Использование Unity3D и аппарата кватернионов позволяет эффективно управлять трехмерными объектами без чрезмерной нагрузки на вычислительные ресурсы.

Общая схема функционирования ПАК, представленной на рисунке 10, строится по принципу «моделирование – анализ – визуализация». На вход поступают параметры модели разработки РЛС. Вычислительное ядро (C#/Visual Studio) производит расчет динамики и комплексного риска.



Источник: составлено автором.
Рисунок 10 – Общая схема ПАК

Результаты расчетов передаются в блок визуализации (Unity3D), где формируется интерактивное представление фазовой траектории и области допустимых рисков. На основе анализа визуализированных данных принимается решение о параметрах адаптивного финансового воздействия, которое может быть введено в модель для оценки последствий.

Разработанный ПАК полностью соответствует классу 02.10 «Программно-аппаратные комплексы математического и имитационного моделирования» согласно классификатору [1]. Данный вывод обоснован тем, что комплекс предоставляет возможность имитации (моделирования) процесса функционирования сложной системы – процесса разработки РЛС. Решаемые комплексом задачи (анализ, прогнозирование и визуализация поведения системы в условиях неопределенности на основе математических моделей и имитационного эксперимента) являются определяющими для указанного класса и соответствуют его описанию: «программно-аппаратные комплексы, предоставляющие возможность имитации (моделирования) процесса функционирования различных изделий и систем».

4.2 Описание вычислительного эксперимента по оценке эффективности методики адаптивного финансирования разработки

В данном параграфе представлен порядок и схема проведения вычислительного эксперимента по численному подтверждению эффективности методики адаптивного финансирования разработки РЛС в условиях неопределённости.

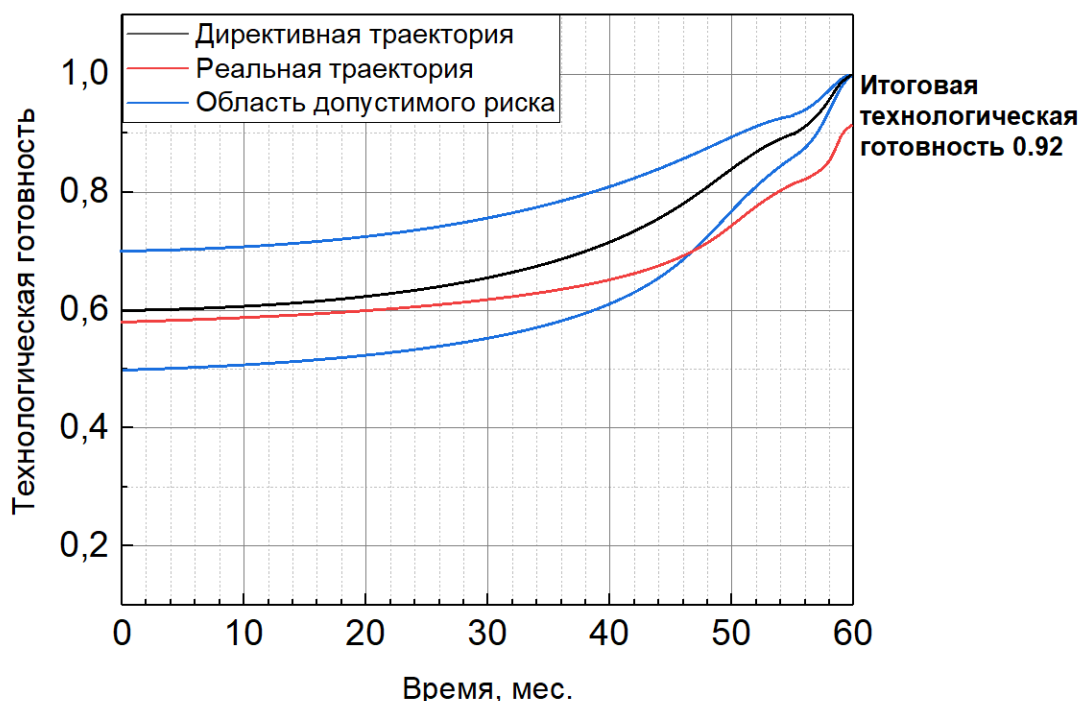
Постановка вычислительного эксперимента.

Целью вычислительного эксперимента является исследование эффективности методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ. Эффективность разработанной методики

демонстрируется путем сравнения динамики разработки в двух типовых проблемных ситуациях при использовании традиционного подхода, то есть без адаптивного управления, и при применении разработанной методики.

Для проведения эксперимента смоделированы два сценария развития разработки блоков РЛС, отражающих типовые риски крупных проектов.

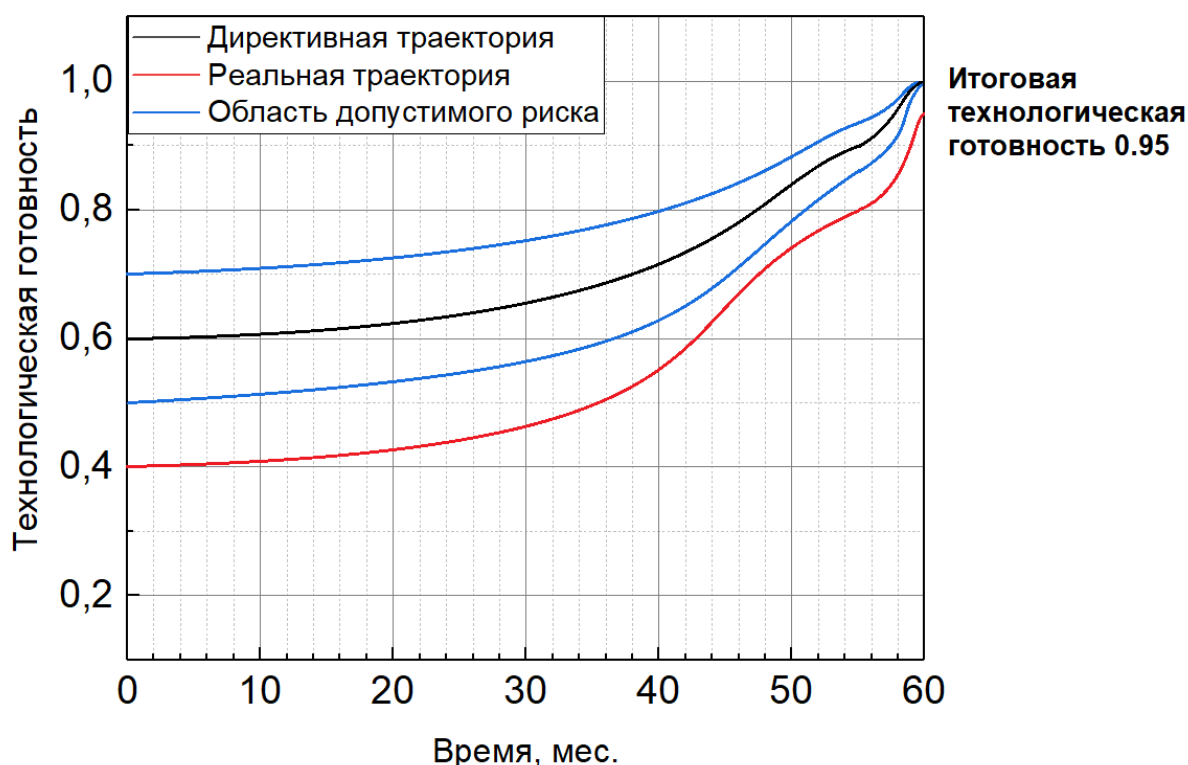
Сценарий А. Возникает критическое отклонение, как показано на рисунке 11. Начальные параметры проекта оказались близки к фактическим, но под влиянием внутренних или внешних возмущающих воздействий траектория процесса создания блока РЛС в некоторый момент времени выходит за границы области допустимого риска. При традиционном подходе к управлению, не предусматривающем адаптивного финансирования работ, данное отклонение не компенсируется. Это приводит к неконтролируемому росту рисков, срыву установленных сроков разработки и, как следствие, к недостижению целевых показателей проекта.



Источник: составлено автором.

Рисунок 11 – Сценарий А, реальная траектория разработки блока РЛС выходит за пределы границ (области) допустимого риска из-за малой неопределенности, в результате чего не достигает полной технологической готовности

Сценарий Б. Возникает начальное отставание, как показано на рисунке 12. Фактические параметры процесса разработки на стартовых этапах оказываются существенно ниже плановых (траектория процесса изначально проходит ниже прогнозируемой области допустимых значений). К тому же ситуация характеризуется существенным уровнем неопределенности из-за недооценки возмущающих факторов. В отсутствие оперативных корректирующих воздействий, предусмотренных методикой адаптивного финансирования, такое отставание имеет тенденцию к накоплению (эффект инерционности процесса разработки), что в конечном итоге также ведет к срыву директивных сроков и невозможности выполнения целевых показателей.



Источник: составлено автором.

Рисунок 12 – Реальная траектория разработки блока РЛС из-за низких начальных показателей и высокой неопределенности не достигает полной технологической готовности

В каждом сценарии происходит сравнение известных способов оценки рисков (вероятностное и фактическое отклонение) с предложенным (53).

Вероятностный способ опирается на предположение о том, что возмущающие факторы подчиняются известному вероятностному закону (например, нормальному распределению с заданными параметрами). На основе этого вычисляется вероятность того, что фактические показатели будут меньше определенного порогового значения. Такая вероятность вычисляется методом Монте-Карло. Такой подход требует корректной статистической информации о параметрах неопределённости, а также устойчивости этих параметров во времени. Однако в условиях длительных и уникальных разработок, характерных для РЛС, достоверные данные о распределениях часто отсутствуют, а сами возмущения могут быть нестационарными.

Способ на основе фактических отклонений основывается на сравнении текущих значений контролируемых параметров с их плановыми значениями. Для этого вычисляются частные показатели риска – по готовности, по календарному графику и по бюджету. Каждый из них представляет собой меру отставания. Затем эти частные показатели объединяются в интегральную оценку (в данном эксперименте с помощью взвешенного суммирования $R = (\alpha R_{\Gamma} + \beta R_{\text{кл}} + \gamma R_{\text{к}}) \cdot s(t)$). Этот метод прост в реализации и не требует предположений о распределениях, но он чувствителен к кратковременным выбросам и не учитывает динамику накопления отклонений, что может приводить к запаздывающему или излишне частому срабатыванию управляющих сигналов.

С целью проведения оценки эффективности предложенной методики каждый из указанных сценариев реализуется в двух вариантах.

Вариант 1 (базовый, без адаптивного финансирования). Процесс разработки моделируется в соответствии с исходными данными. ПАК выполняет расчет траектории, комплексного риска и строит область допустимых рисков. Механизм дополнительного финансирования не

используется. Этот вариант служит контрольной точкой для демонстрации негативного развития событий: траектория выходит из допустимой зоны или не возвращается в нее после отклонения. Здесь происходит сравнение различных оценок.

Вариант 2 (с адаптивным финансированием). Процесс разработки моделируется с теми же исходными параметрами, что и в базовом варианте. ПАК в ходе имитационного моделирования в реальном времени отслеживает положение фазовой траектории относительно границ области допустимого риска и рассчитывает необходимый объем финансирования. Это позволяет в случае необходимости скорректировать траекторию. В результате, несмотря на исходные возмущения, процесс разработки возвращается в допустимую область и удерживается в ней.

В этом сценарии сравнивается результат на основе наилучшей оценки с управлением по методике с результатами без управления.

Сравнительный анализ проводится путем многократного прогона обоих сценариев (А и Б) в двух вариантах (с адаптивным финансированием и без) на разработанном ПАК. Визуализация траекторий и областей допустимого риска позволяет наглядно оценить поведение системы. Количественными показателями эффективности выступают:

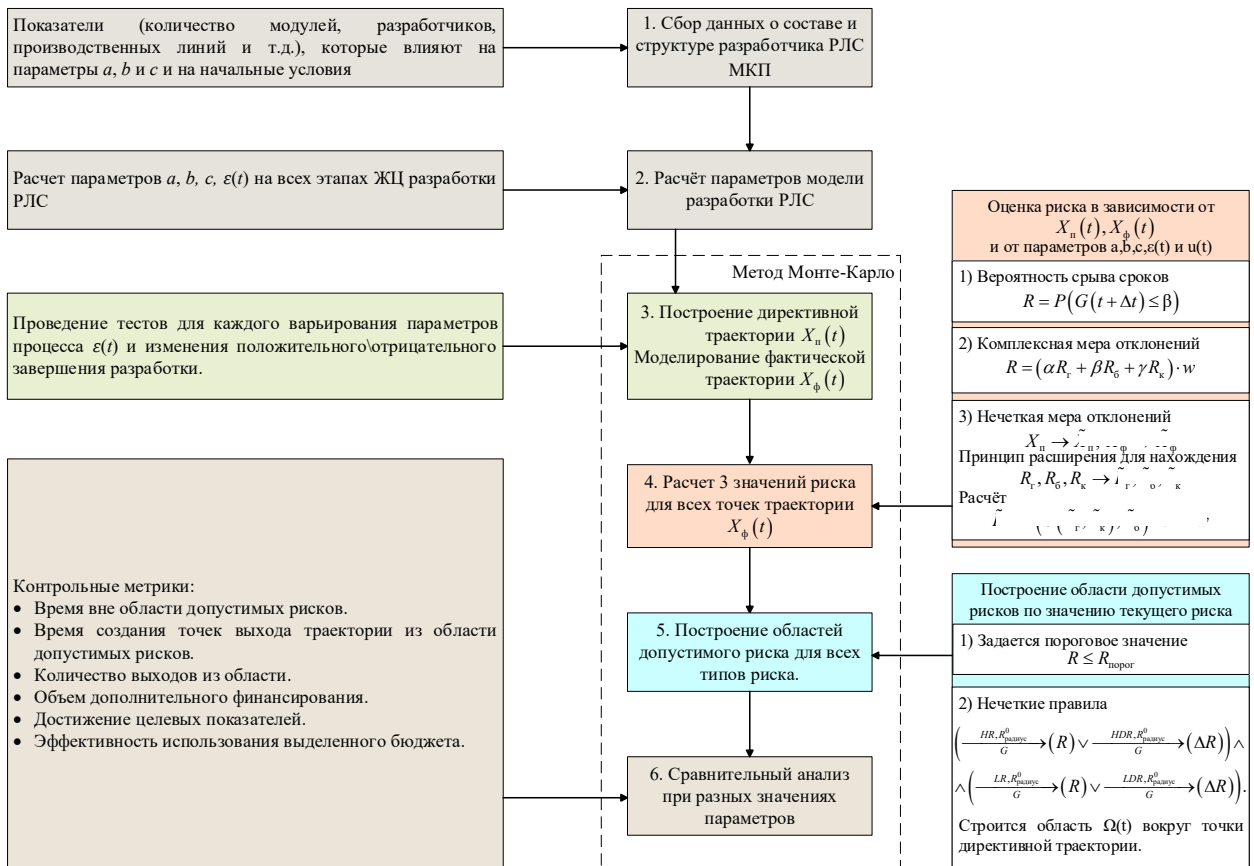
- время пребывания траектории вне допустимой зоны;
- совокупные затраты на компенсацию возмущений;
- количество успешно завершенных разработок.

Цель эксперимента заключается в оценке результативности разработанной методики адаптивного финансирования, реализованной в ПАК, и направленной на оптимизацию процесса разработки РЛС. Решения, принимаемые на основе предлагаемой методики, позволяют своевременно возвращать траекторию разработки в область допустимого риска и, тем самым, обеспечивать выполнение целевых показателей (готовность компонентов, сроки разработки, стоимость) проекта. Результатом применения методики

должно стать обеспечение завершения разработки в установленные сроки с оптимальными показателями эффективности (нахождение в области допустимых рисков и дополнительные затраты).

Структура вычислительного эксперимента.

Схема вычислительной части эксперимента представлена на рисунке 13.



Источник: составлено автором.

Рисунок 13 – Схема численного эксперимента по оценке эффективности методики адаптивного финансирования

На рисунке 13 представлена структурная схема проведения вычислительного эксперимента, которая детализирует последовательность операций по оценке эффективности методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования.

На первом этапе осуществляется сбор исходных данных, характеризующих процесс разработки блока РЛС, включая плановые показатели, ограничения по ресурсам и возможные возмущающие

воздействия. На основе собранных данных выполняется расчет параметров модели разработки, определяющих динамику изменения состояния системы и её чувствительность к управляющим воздействиям. Далее производится построение директивной траектории процесса и расчет границ области допустимого риска, которые задают коридор безопасного ведения работ.

На следующем этапе моделируется фактическая траектория разработки в условиях воздействия возмущений без применения адаптивного финансирования, что позволяет выявить участки, на которых возникает необходимость в корректировке финансирования. После этого проводится моделирование фактической траектории с учётом адаптивного финансирования, реализующего предложенную методику управления. На завершающем этапе выполняется сравнительный анализ полученных фактических траекторий для каждого сценария.

Предложенная последовательность действий позволяет оценить эффективность методики за счёт сравнения таких метрик, как интегральное отклонение от директивной траектории, продолжительность выхода за границы области допустимого риска и итоговое смещение сроков завершения разработки относительно плановых.

4.3 Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий А

Моделирование траекторий. Сценарий А.

В данном параграфе рассматривается применение разработанной методики к сценарию А. Методика включает пять основных действий: построение траектории, оценка комплексного риска, формирование области допустимого риска, проверка критериев необходимости и целесообразности, корректировка финансирования.

В первом подпараграфе сценария А моделирование выполняется без реализации последних двух действий – механизм адаптивного

финансирования отключён. Это позволяет оценить поведение системы при отсутствии управляющих воздействий. Во втором подпараграфе сценария А методика применяется в полном объёме, и адаптивное финансирование активируется в соответствии с формулируемыми правилами.

Данный сценарий моделирует ситуацию, при которой заложенная директивная (плановая) траектория разработки недостаточно точно соответствует реальным данным. Фактическая динамика процесса, реализующаяся при текущих темпах работ и утверждённых планах финансирования такова, что траектория разработки отклоняется недопустимым образом от плановой. В результате траектория устойчиво смещается вниз и с течением времени выходит за нижнюю границу области допустимого риска.

Подобное развитие событий может быть обусловлено комплексом причин:

1) искажение исходных данных, предоставленных разработчиком, что может быть следствием непреднамеренных ошибок при планировании и экспертной оценке, или результатом намеренного завышения показателей (например, для получения приоритета при распределении заказов);

2) непрогнозируемые изменения во внутренней среде предприятия-разработчика, включая сбои в производственной кооперации;

3) воздействие внешней финансово-экономической среды (рост инфляции, изменение ключевой ставки и т.п.), которое влияет на реальный уровень заработной платы и может косвенно сказаться на доступности квалифицированных кадров в отрасли, что в конечном итоге отражается на производительности;

4) заниженная первоначальная оценка возмущающих факторов, не отражающая реальный уровень нестабильности.

Для достижения целей вычислительного эксперимента и обеспечения корректности сравнительного анализа методов оценки риска было выполнено

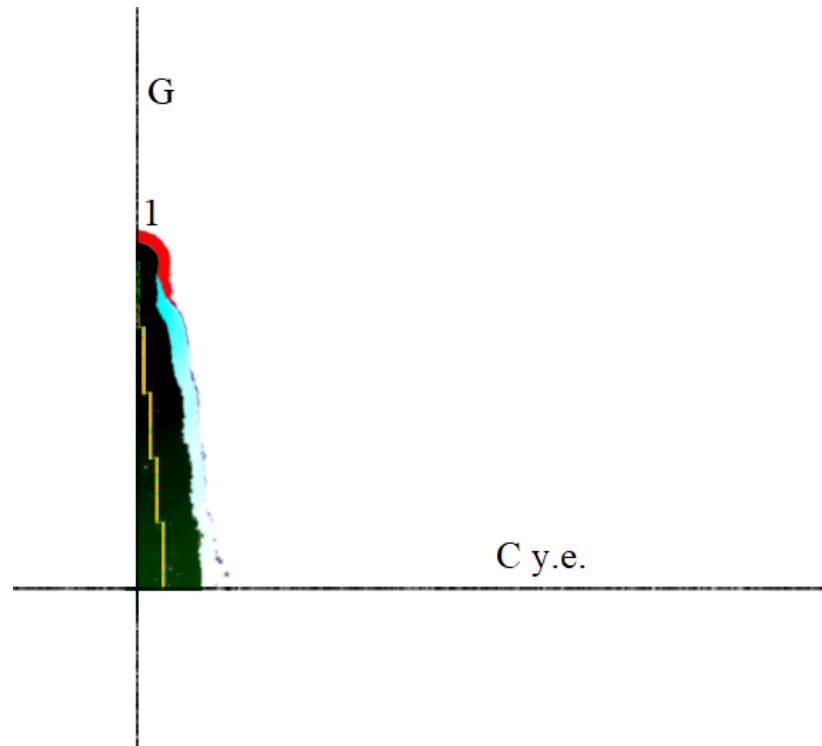
уточнение параметров модели создания РЛС. В рамках методологии, основанной на вероятностном подходе, произведён пересмотр характеристик возмущений $\varepsilon(t)$ и соответствующих коэффициентов. Данный шаг является необходимым, поскольку использование в прогнозной модели заведомо ошибочных (излишне оптимистичных) оценок исказило бы результаты и не позволило бы получить репрезентативные выводы о сравнительной эффективности различных способов расчёта риска.

Сценарий А. Разработка без адаптивного финансирования.

Построение фазовых и кинетических портретов выполнено в среде разработки Unity3D, код был написан на языке C#.

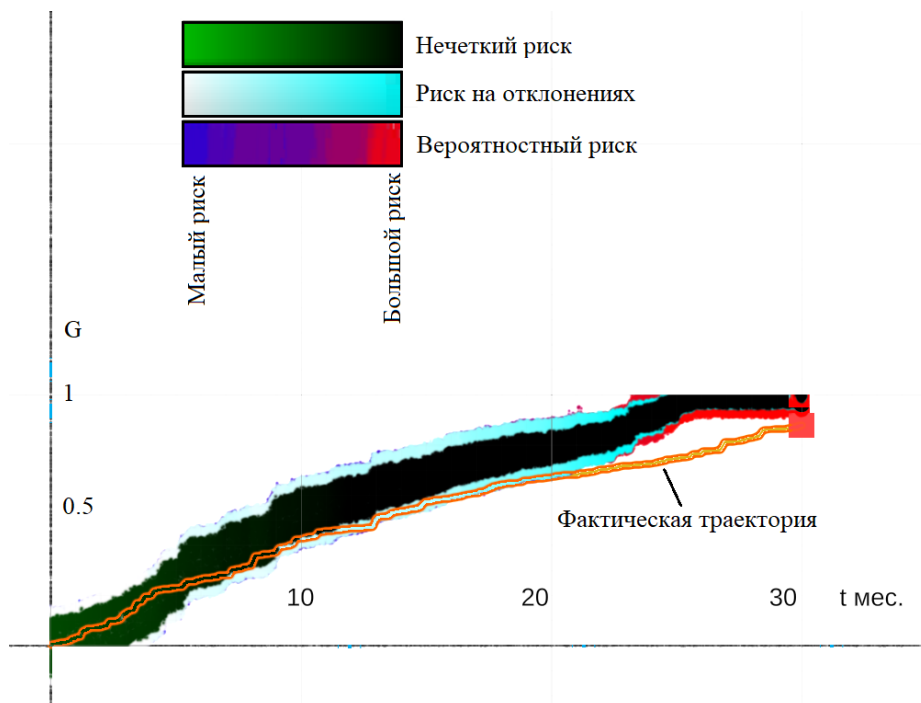
В этом подпараграфе моделирование выполняется без реализации двух завершающих действий методики: не проверяются критерии необходимости и целесообразности, не производится корректировка финансирования. В результате управляющие воздействия отсутствуют, и траектория разработки не возвращается в допустимую область. Это приводит к тому, что к установленному сроку целевое значение технической готовности ($G = 1$) не достигается. Фактически полученное значение составляет 0,9. Таким образом, процесс разработки признаётся сорванным.

Фазовый портрет на рисунке 14 показывает взаимосвязь технической готовности и бюджета. Он показывает расположение фактической фазовой траектории относительно области допустимых рисков. Динамика на этом фазовом портрете не отражена. На фазовом портрете фактическая траектория может находиться внутри проекции области допустимых рисков. На кинетическом портрете видно, что из самой области траектория разработки вышла. В фазовых пространствах «техническая готовность – риск» и «бюджет – риск», фазовые портреты тоже будут недостаточно информативными. Двумерный кинетический портрет на рисунке 15 не отражает изменений бюджета.



Источник: составлено автором.

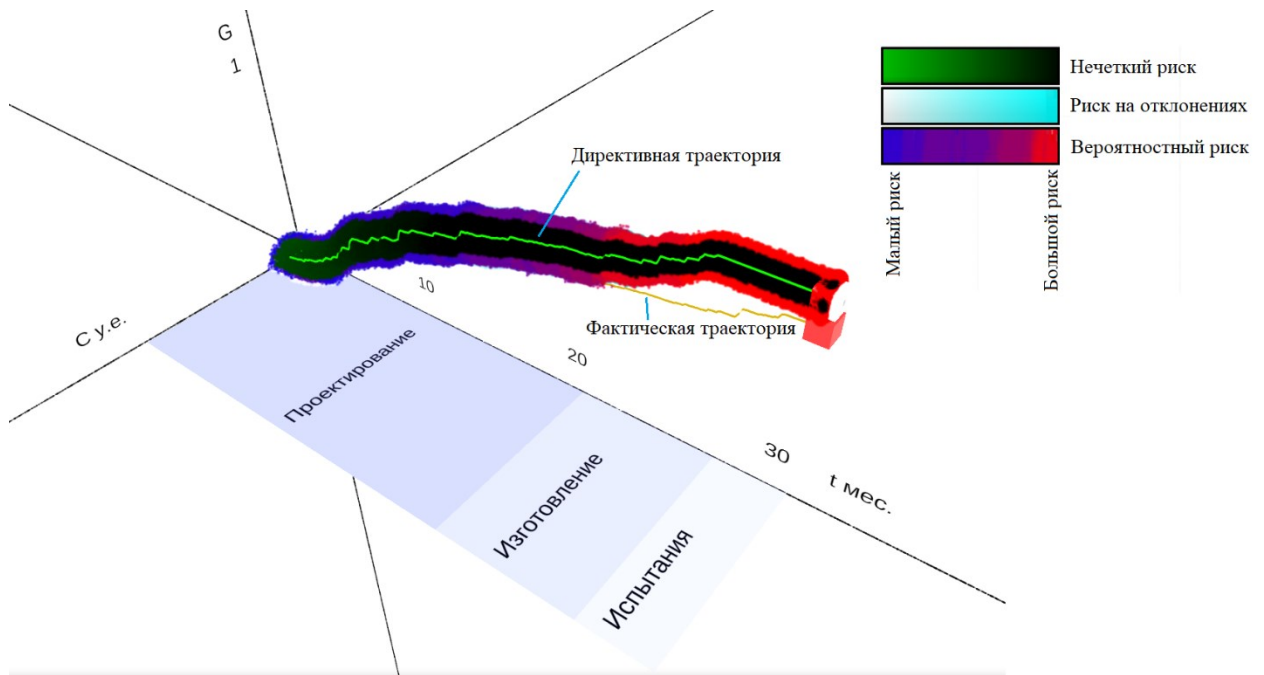
Рисунок 14 – Фазовый портрет траекторий и проекции областей допустимого риска вокруг нее



Источник: составлено автором.

Рисунок 15 – Кинетический портрет моделируемой фактической траектории разработки (оранжевая траектория) и проекции областей допустимого риска вокруг директивной траектории

Бюджет и техническую готовность нельзя рассматривать отдельно от риска, для адекватного и информативного анализа необходимо совокупно учитывать на графике: бюджет, техническую готовность, время и значение риска. Такой способ показан на рисунке 16.



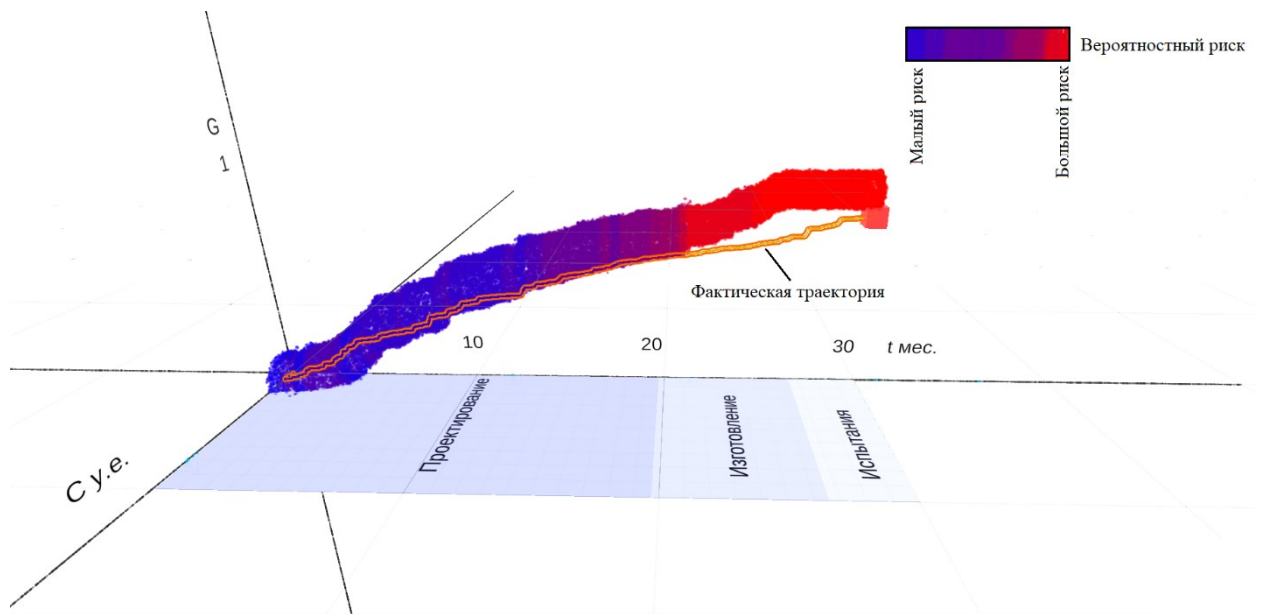
Источник: составлено автором.

Рисунок 16 – Кинетический портрет моделируемой фактической траектории разработки (оранжевая траектория) и проекции областей допустимого риска вокруг директивной траектории

Рассмотрим подробнее на рисунке 17 построение области на основе вероятностного риска.

Выход фактической траектории разработки наблюдается на этапе проектирования и конкретно в этот момент начинает меняться и само значение вероятностного риска. Размер области начинает динамически меняться (изменение размера чувствительно и к изменению риска), красное значение риска говорит о высокой вероятности срыва разработки. Такое поведение при текущих условиях моделирования позволяет адекватно описывать состояние разработки РЛС.

На рисунке дифференциация цвета связана с величиной риска. Размер области, определяется на основе правил вывода согласно (68). При высоком значении риска и его росте – область маленькая, при низком значении риска и его дальнейшем убывании – радиус области большой (то есть отклонения могут быть большими).



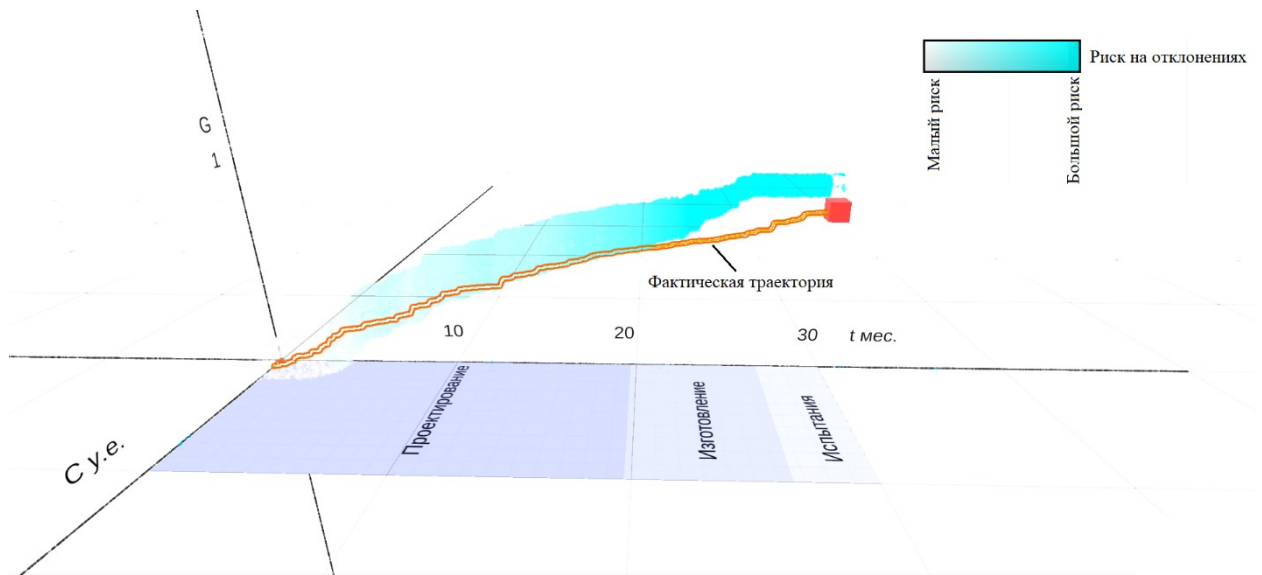
Источник: составлено автором.

Рисунок 17 – Вероятностная оценка риска

На графике провального сценария разработки, где из-за искажений исходных данных фактическая траектория отклоняется от плановой, наблюдается характерная динамика показателя риска. Вероятностная оценка, несмотря на присущую ей волатильность, верно отражает общую негативную тенденцию. Ее значения демонстрируют выраженный рост на рисунке 18 по мере приближения к концу проекта, сигнализируя о накоплении факторов, ведущих к срыву сроков.

Фактическая комплексная мера отклонения показывает на рисунке 18 тенденцию, схожую с вероятностной. Пока траектория находится в допустимой области (то есть недалеко отклонилась от плановой траектории), риск низкий. Когда перед этапом изготовления траектория выходит из допустимой области начинает меняться комплексная оценка отклонений и

размер области допустимых рисков. Оценка по фактическим отклонениям, рассчитанная как мера отставания и отклонений, последовательно увеличивается, однако вблизи планового срока завершения проекта снижается.



Источник: составлено автором.

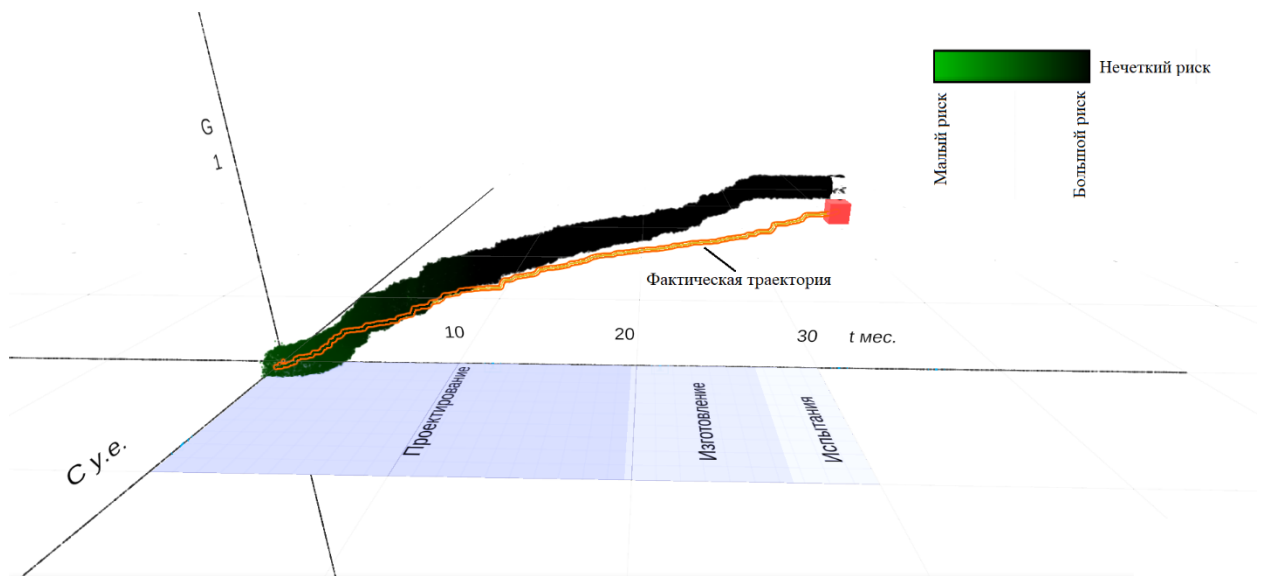
Рисунок 18 – Оценка риска на основе расчета фактических отклонений разработки

Нечеткая оценка на рисунке 19 обеспечивает наиболее адекватную и плавную динамику: она монотонно возрастает по мере накопления отклонений и, благодаря использованию мягких вычислений, корректно отражает высокий итоговый риск даже на конечных этапах, избегая аномалий и сохраняя тенденции вероятностного способа.

Разработанный ПАК адекватно описывает состояние проекта. При этом на трёхмерном графике (бюджет-готовность-время) наблюдается характерная картина: готовность модулей постепенно увеличивается, оставшийся бюджет закономерно сокращается, но в условиях негативного сценария цветовая дифференциация траектории указывает на сопутствующий рост комплексного риска.

Таким образом, проведённая оценка с помощью ПАК позволяет определить критический момент на раннем этапе, когда для успешного

завершения разработки требуется осуществить управляющие воздействия (например, увеличить финансирование для компенсации возмущений).



Источник: составлено автором.

Рисунок 19 – Оценка риска на основе расчета нечеткой оценки отклонений разработки

Представленные на рисунках 16-19 графики демонстрируют, что в условиях Сценария А все три подхода качественно верно отражают общую негативную тенденцию роста риска по мере приближения к финалу. Вероятностный метод адекватно сигнализирует о проблеме. Метод фактических отклонений на большей части дистанции коррелирует с отставанием. Нечёткая оценка, в свою очередь, обеспечивает наиболее сглаженную динамику, свободную от шумов.

Для визуального анализа на данном этапе различия между методами не носят того критического характера, который позволил бы сделать вывод о преимуществе одного из них. Главное преимущество нечеткой оценки проявляется в сценарии Б, где уровень неопределенности и интенсивность возмущающих воздействий возрастают.

Плавность и монотонность нечеткой оценки является ключевым фактором для работы алгоритма адаптивного финансирования. Нечеткая оценка позволяет избежать ложных срабатываний механизма поддержки на

случайные всплески возмущающих факторов и сформировать устойчивое управляющее воздействие.

Сценарий А. Разработка с адаптивным финансированием.

Под адаптивным финансированием понимается комплекс управляющих воздействий, направленных на возврат траектории разработки в область допустимого риска. В реальных условиях это во многом зависит от текущего этапа разработки. Например, такими мерами могут выступать:

- дополнительные платежи на закупку недостающих комплектующих или материалов;
- финансирование ускоренной переналадки производственных линий;
- выделение средств на проведение внеочередных циклов испытаний;
- перераспределение финансовых потоков с менее критических направлений на проблемные участки.

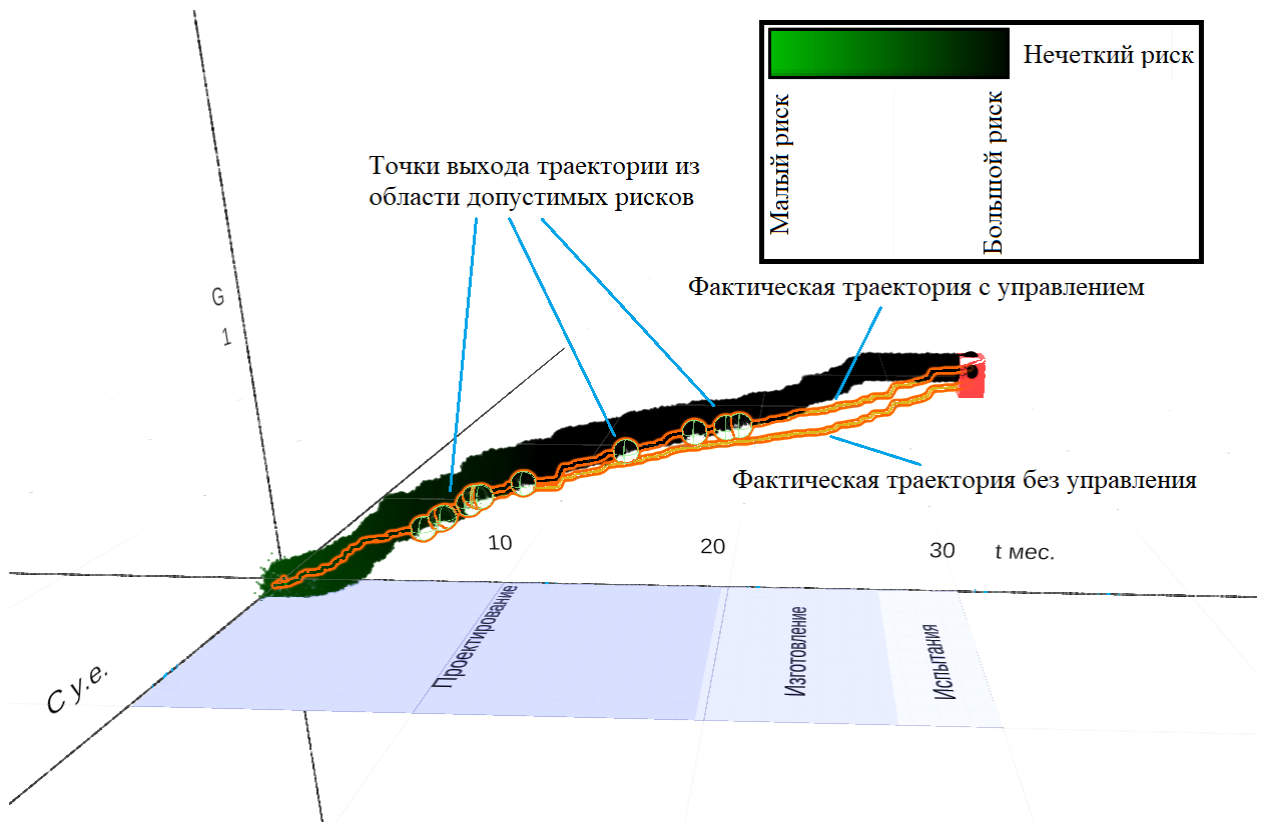
В рамках математической модели (22), реализованной в ПАК, эффект от адаптивного финансирования выражается в корректировке ключевых показателей процесса: дополнительное финансирование влияет на скорость изменения технической готовности. Конкретный состав и форма указанных мер могут варьироваться в широких пределах в зависимости от специфики предприятия и характера возникших отклонений.

В рамках данного вычислительного эксперимента моделирование адаптивного воздействия осуществлялось на обобщённом уровне. Для точек траектории, где комплексный риск превышал пороговое значение (то есть фактическая траектория выходила из области допустимых рисков), автоматически рассчитывался требуемый объём дополнительных вложений, достаточный для возврата процесса в допустимую область.

Определим критерий необходимости финансирования. Если фактическая траектория выходит из области допустимых рисков, то

управляющее воздействие на определенном временном промежутке получает значение $u = 0.5$. Рассмотрим результаты моделирования, представленные на рисунке 20. Сферами представлены точки выхода фактической траектории (с управлением) из области допустимых рисков. В этих точках начинает применяться управление. Для сравнения на рисунке представлено две фактические траектории – с управлением и без управления.

Фактическая траектория первый раз выходит из области допустимых рисков примерно через полгода после начала разработки. В результате финансового воздействия целевое значение 1 технической готовности РЛС достигнуто на 29 месяце. Значение готовности 1 на конец разработки означает, что ключевые показатели достигнуты. В результате осуществленного управления траектория в последние месяцы находится в области допустимых рисков, а требуемые значения ключевых показателей разработки достигнуты.



Источник: составлено автором.

Рисунок 20 – Кинетический трехмерный портрет моделируемой фактической траектории разработки с управлением (и без) на основе нечеткой оценки рисков, сферы показывают точку принятия решения о финансировании при выходе из области допустимых рисков

Моделирование траекторий осуществлялось численно. Траектория представляет собой ломанную линию, где отрезок протяженностью в один месяц, состоит из 60 промежутков (было выбрано для удобства моделирования в реальном времени, это частота кадров). Как было показано в работе [53], чем реже осуществляется мониторинг состояния моделируемого объекта и последующее управление, тем менее адекватной становится вероятностная оценка и более результативным оказывается мягкое управление.

При создании РЛС осуществлять с такой частотой мониторинг состояния разработки, тем более, осуществлять с такой частотой финансовое вмешательство не представляется возможным. Сбор данных и создание соответствующей информационной системы будет стоить несоразмерно результату, а порядок утверждения дополнительных финансовых средств не позволяет утверждать новые транши чаще, чем раз в месяц. Т.е. при реальной разработке в условиях неопределенности результативность управления с использованием вероятностей оценок еще более снижается.

Полученные в ходе моделирования графики наглядно демонстрируют, как упреждающее воздействие позволяет скорректировать динамику разработки. Траектория, начавшая отклоняться за нижнюю границу области допустимого риска, под влиянием адаптивного финансирования возвращается в безопасную зону и удерживается в ней до завершения проекта. Это отличает данный вариант от базового сценария, где отсутствие финансирования приводит к необратимой деградации процесса.

4.4 Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий Б

Сценарий Б представляет более сложный случай для разработанной методики. Здесь условия функционирования приближены к стрессовым. В отличие от сценария А, где анализировались только основные показатели, здесь используются дополнительные количественные характеристики. Это

позволяет исследовать работоспособность методики при высокой неопределённости. Особое внимание уделяется построению траектории, оценке комплексного риска (сравниваются три способа), формированию области допустимого риска, проверке критериев необходимости и целесообразности и корректировке финансирования. Сравнение трёх способов оценки риска (вероятностного, по фактическим отклонениям и нечёткого) позволяет выявить, какой из них обеспечивает наиболее устойчивое управление в условиях высокой неопределённости.

Целью второго сценария является проверка пределов применимости разработанной методики адаптивного финансирования при её помещении в стрессовые условия функционирования. Данный сценарий моделирует реальную производственную ситуацию, характеризующуюся большой неопределённостью, когда разработчик не располагает репрезентативной статистикой возмущений и не имеет возможности сформировать удовлетворительный прогноз их параметров.

В отличие от первого сценария, где имело место лишь искажение исходных данных, во втором сценарии имитируется качественно более высокий уровень неопределённости. Разработчик изначально неточно оценил параметры, и вынужден функционировать в среде, где фактические возмущающие воздействия существенно превышают даже самые пессимистичные плановые оценки. Таким образом, разработанная методика адаптивного финансирования подвергается одновременному воздействию двух негативных факторов:

- систематической ошибки в исходных данных, заложенных в модель планирования;
- непредсказуемо высокой внешней стохастичности, многократно усиливающей отклонения фактической траектории от директивной.

Подобное сочетание позволяет в полной мере проверить адаптивные свойства и устойчивость предложенного подхода к управлению разработкой.

Именно в таких экстремальных условиях проявляются преимущества методики, основанной на комплексной оценке риска и оперативном реагировании, перед традиционными (в частности, вероятностными) методами, которые в условиях высокой неопределённости теряют прогностическую способность.

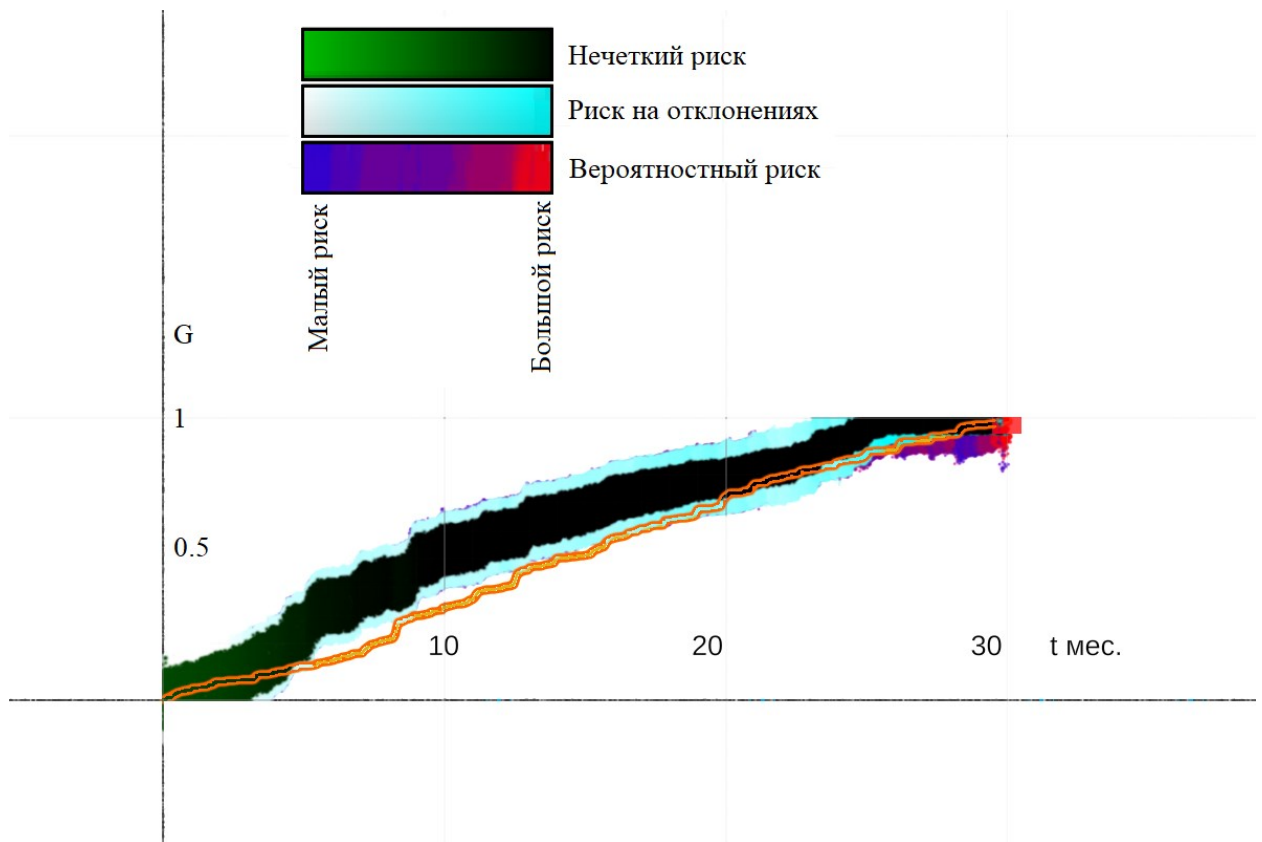
Сценарий Б. Разработка без адаптивного финансирования.

Рассмотрим влияние особенностей сценария Б на процесс моделирования. Параметры возмущающего процесса $\varepsilon(t)$ принимают более высокие значения по сравнению с плановыми оценками: в начале разработки среднее квадратическое отклонение составляет $\sigma = 8.1$, а математическое ожидание $\mu = 6.4$; к завершению проекта эти показатели снижаются до $\sigma = 8.0$ и $\mu = 6.0$. Переход к новым значениям осуществляется линейно с темпом $(8.1 - 8)/T$ и $(6.4 - 6)/T$ соответственно, где T – общая продолжительность разработки.

Увеличение интенсивности возмущений относительно плановых параметров призвано имитировать совокупное воздействие ряда негативных факторов, характерных для уникальных и технологически сложных проектов. К числу таких факторов относятся незапланированное ужесточение внешних ограничений, включая санкционное давление или разрыв кооперационных цепочек, принципиальная новизна применяемых технологий, не позволяющая опереться на репрезентативные исторические данные, а также внутренние организационные кризисы разработчика, связанные с изменением состава квалифицированных кадров и сбоями в системе управления. К концу проекта, по мере накопления опыта и завершения наиболее рискованных этапов работ, уровень неопределенности закономерно снижается, что находит отражение в уменьшении параметров $\varepsilon(t)$ к финальному моменту времени.

При проведенном моделировании плановое итоговое значение технической готовности принимает значение 1, а фактическое 0,98. Целевые

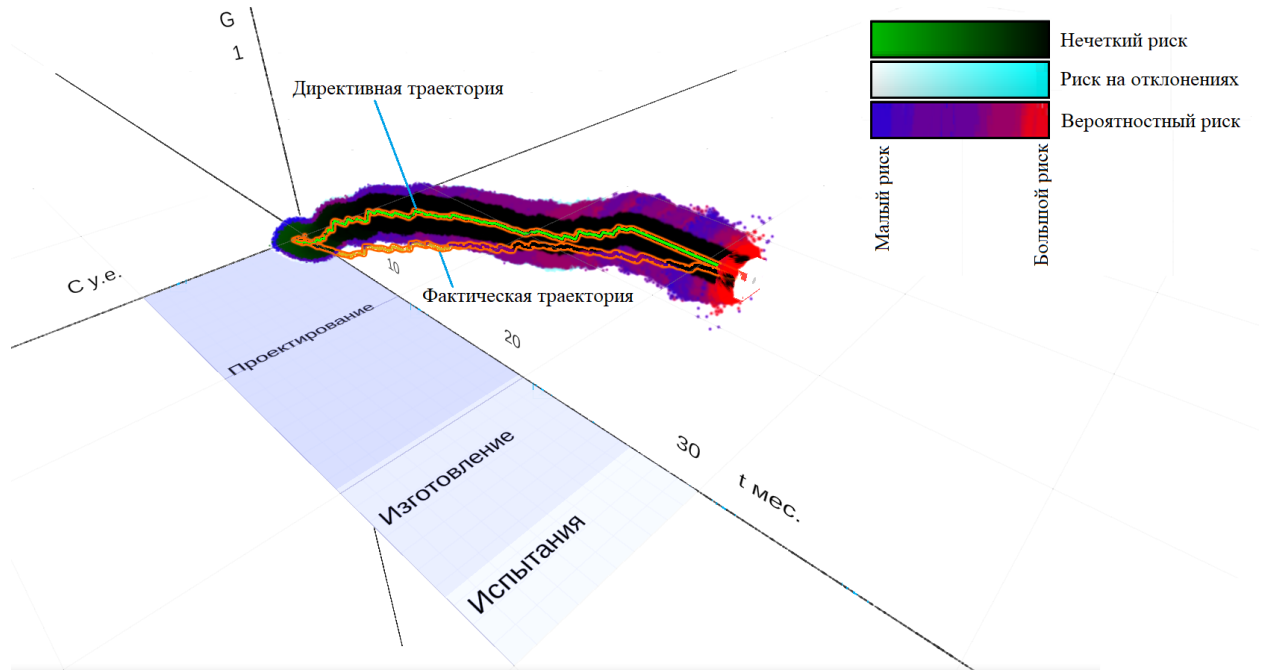
показатели на конец срока разработки не достигнуты. Рассмотрим графики при новых условиях на рисунке 21.



Источник: составлено автором.

Рисунок 21 – Кинетический портрет моделируемой фактической траектории разработки (оранжевая траектория) и сравнение областей допустимого риска вокруг директивной траектории

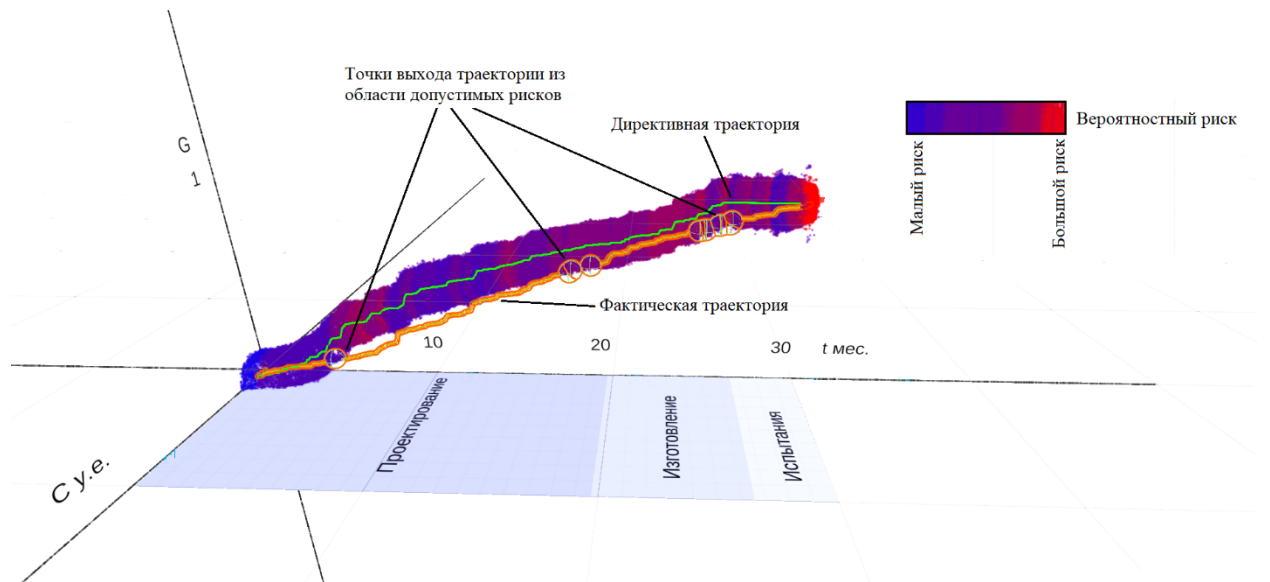
На рисунке 22 наблюдается непосредственный выход фактической траектории из области допустимого риска, построенной на основе нечеткой оценки отклонений и попеременные входы-выходы из других областей. Особое внимание заслуживает область допустимого риска, построенная на основе вероятностной оценки. Она оказывается менее информативной в части отражения фактического состояния разработки по сравнению с областями, построенными на основе двух других подходов. Особенности каждого подхода будут проанализированы ниже.



Источник: составлено автором.

Рисунок 22 – Кинетический портрет траекторий разработки и области

На трехмерном рисунке 23 отображены директивная и фактическая траектории в пространстве «готовность – бюджет – время», что позволяет наблюдать изменение всех ключевых показателей во времени.



Источник: составлено автором.

Рисунок 23 – Оценка риска на основе вероятностного подхода

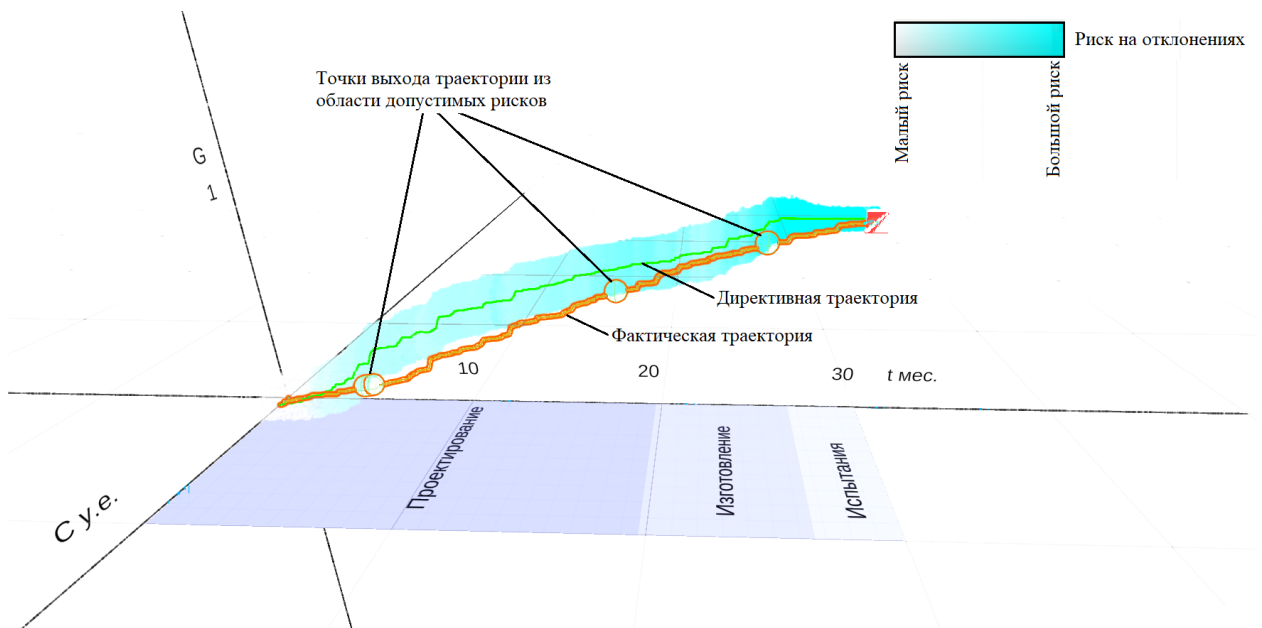
Поведение построенной на основе вероятностного подхода траектории на рисунке 17 в сценарии А отличается от ее поведения на рисунке 23 в сценарии Б. В сценарии Б поведение оказывается менее устойчивым. По размеру и цвету области допустимого риска наблюдается более поздняя фиксация негативных значений показателей разработки. Нет ясного значения риска. При значительном отклонении траектории на этапе проектирования риск довольно мал (хотя наблюдается скачок риска в районе 7-го месяца и соответствующее сужение области). Ближе к изготовлению начинается изменение значений риска, однако устоявшейся тенденции еще нет, риск принимает то большое, то малое значение. Только на последних этапах вероятностный риск начинает показывать негативную оценку состояния разработки, при этом наблюдаются скачки значений риска и изменение размеров области в сравнении с рисунком 17.

Это объясняется тем, что высокая неопределенность не позволяет построить адекватный прогноз даже в конце разработки. При небольших значениях стандартного отклонения точность вероятностного прогноза повышается при увеличении числа итераций в методе Монте-Карло, однако при увеличении исследуемого показателя (как в данном эксперименте) этот способ не дает эффекта.

Подтверждением того, что вероятностная оценка не позволяет адекватно отражать состояние разработки является тот факт, что наблюдается большое количество точек выхода (11 шт.) фактической траектории разработки из области допустимого риска. Таким образом, часто возникает пограничная ситуация, когда траектория выходит из допустимой области и, следовательно – нарушен ход разработки (общее время нахождения вне области 14,86 мес.), но вскоре траектория возвращается, что должно сигнализировать об адекватном ходе разработки. Частая смена сигналов создает дополнительные сложности административному аппарату (для принятия решений о финансировании разработки), не позволяет выявлять общую динамику

процесса (размер области строится не только на текущем значении риска, но и на его изменении), не позволяет вовремя на ранних этапах реагировать финансовыми воздействиями на ход разработки. Более позднее выделение средств не позволит исправить ошибки за короткий срок, отсутствие своевременного реагирования не позволяет выполнить целевые показатели.

Рассмотрим на рисунке 24 поведение траектории, построенной на основе расчета фактических отклонений разработки. В сравнении с рисунком 18 в сценарии А видны следующие изменения: уменьшение размера области при значительных отклонениях траектории около 10-го месяца и после 25-го месяца (более поздняя реакция, чем в сценарии А). Видна конкретная тенденция риска, показывающая рост негативных значений показателей разработки. Сужение области допустимого риска в конце объясняется, в том числе, ростом календарного риска.



Источник: составлено автором.

Рисунок 24 – Оценка риска на основе расчета фактических отклонений разработки

У этого способа построения расчета риска больше преимуществ в условиях существенной неопределенности, чем у способа на основе вероятностной оценки. Он показывает более ранний рост риска, чем

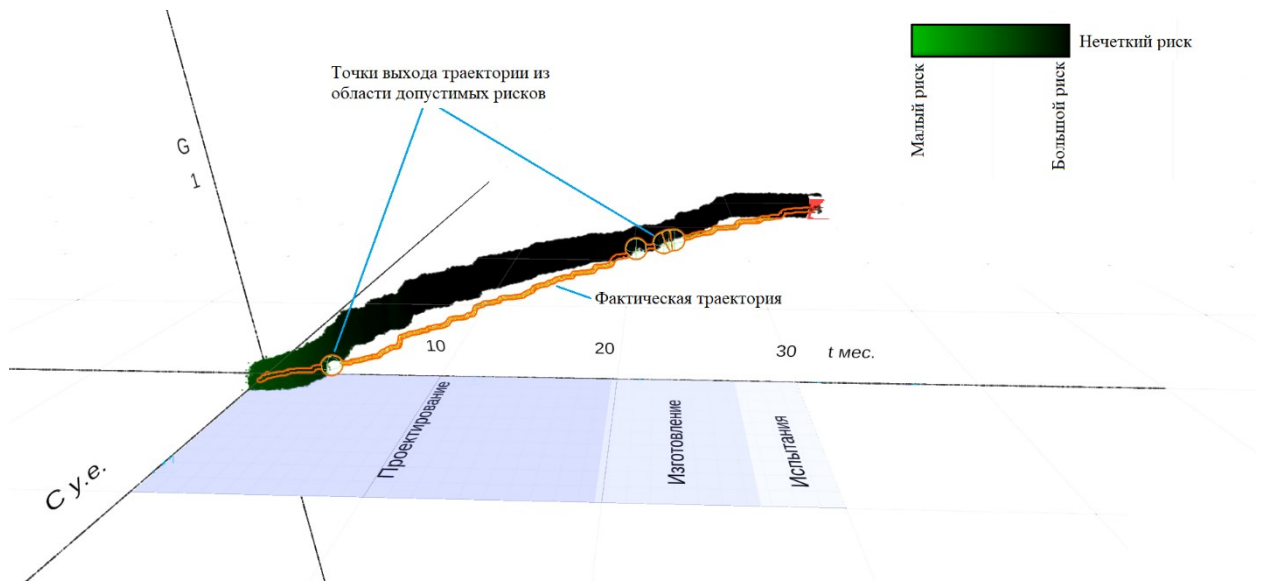
вероятностный аппарат. Он устойчиво показывает тенденцию риска. Оценка на основе фактических отклонений раньше сужает область, что сигнализирует о возможном срыве сроков разработки. Корректировка размеров области осуществляется на всех этапах ЖЦ разработки РЛС, но наиболее существенное изменение размера области происходит в основном на последних этапах. Это происходит, когда возникает значительное отклонение по календарным срокам, а не только по фактическим значениям технической готовности и бюджета. Например, сходные отклонения по технической готовности и бюджету не ведут к сужению области на завершении этапа проектирования, как это происходит при завершении этапа изготовления. Рассматриваемый подход позволяет лучше предыдущего подавать сигналы о негативных изменениях в разработке в условиях неопределенности. Однако получаемые результаты чувствительны к скачкам возмущающих воздействий (аналогичные выводы по схожим расчетам сделаны и подробно проанализированы в работах [52; 53; 55]).

По точкам выхода фактической траектории (4 шт.) из области допустимых рисков можно видеть, что достаточно рано появляются сигналы о срыве разработки компонентов. Отметим, что на большей части этапа проектирования компонентов РЛС траектория находится вне области допустимых рисков (общее время вне области 17,2 мес.), что должно сигнализировать о возможном срыве сроков разработки и о необходимости вмешательства, однако на этапе изготовления траектория возвращается обратно в область.

Рассмотрим теперь нечеткую оценку отклонений на рисунке 25.

На рисунке 25 наблюдается схожее с рисунком 19 в сценарии А поведение нечеткой оценки риска. Видна явная тенденция с первых этапов к росту риска, область меняет свои размеры раньше и более плавно. Видны точки выхода траектории из области допустимых рисков в самом начале проектирования. После этого выхода траектория почти не возвращалась в

область (общее время вне области 22,85 мес.). Это сигнализирует на всех этапах ЖЦ о проблемах в ходе разработки компонентов РЛС.



Источник: составлено автором.

Рисунок 25 – Оценка риска на основе расчета нечеткой оценки отклонений разработки

Важно обращать внимание не только на размер области. Этот способ расчета подходит не из-за малого радиуса области. Очевидно, что предыдущие способы можно изменить так, чтобы радиус был меньше. Здесь важна тенденция, которая сохраняется на всех этапах ЖЦ разработки. Нечеткий способ позволяет снизить влияние нерегулярных скачков возмущающих факторов для того, чтобы адекватно выделять именно основную тенденцию возмущений. Это позволяет строить равномерно сужающуюся (с возможностью изменения радиуса в процессе в зависимости от значений показателя риска и его изменения) область, выход из которой будет сигнализировать о необходимости вмешательства.

Этот способ расчета меньше подвержен влиянию неопределенности, чем вероятностный. Область более чувствительна к общей тенденции возмущающих воздействий, уменьшится влияние крупных скачков возмущающих воздействий. В условиях высокой неопределенности нечеткая оценка лучше фиксирует негативные тенденции, чем вариант на основе

фактических отклонений. Этот способ более критически смотрит на изменения и обеспечивает более безопасное сопровождение хода разработки на протяжении всех этапов ЖЦ. Управление на основе нечеткой оценки риска будет рассмотрено в следующих разделах, как показавшее лучший результат в данном сценарии.

Как показано в работе [53], нечеткое управление демонстрирует определенные преимущества при следующих условиях, которые характерны для сложных технологических проектов:

редкое измерение показателей разработки (затруднительно каждый день отслеживать состояние компонентов РЛС),

управлении с запаздыванием (при редком измерении показателей разработки управление может осуществляться намного позже фактического выхода из области допустимых рисков),

влияние некоторых конкретных событий, воздействующих на ход разработки, может быть продолжительным

значительные временные интервалы между управляющими воздействиями (нагрузка на административный аппарат не позволяет часто менять решения о финансировании).

Тем самым нечеткая оценка отклонений оказывается более предпочтительной при обосновании вмешательства в ход разработки.

Сценарий Б. Разработка с адаптивным финансированием.

В сценарии Б проект не достигает целевых показателей. В данном параграфе рассматривается применение методики адаптивного финансирования из главы 3. Методика реализована в программно-аппаратном комплексе (ПАК).

Управление строится на нескольких ключевых действиях. Это построение директивной и фактических траекторий разработки, оценка комплексного риска, формирование области допустимого риска с

адаптивными границами, проверка критериев необходимости и целесообразности финансового воздействия, управление.

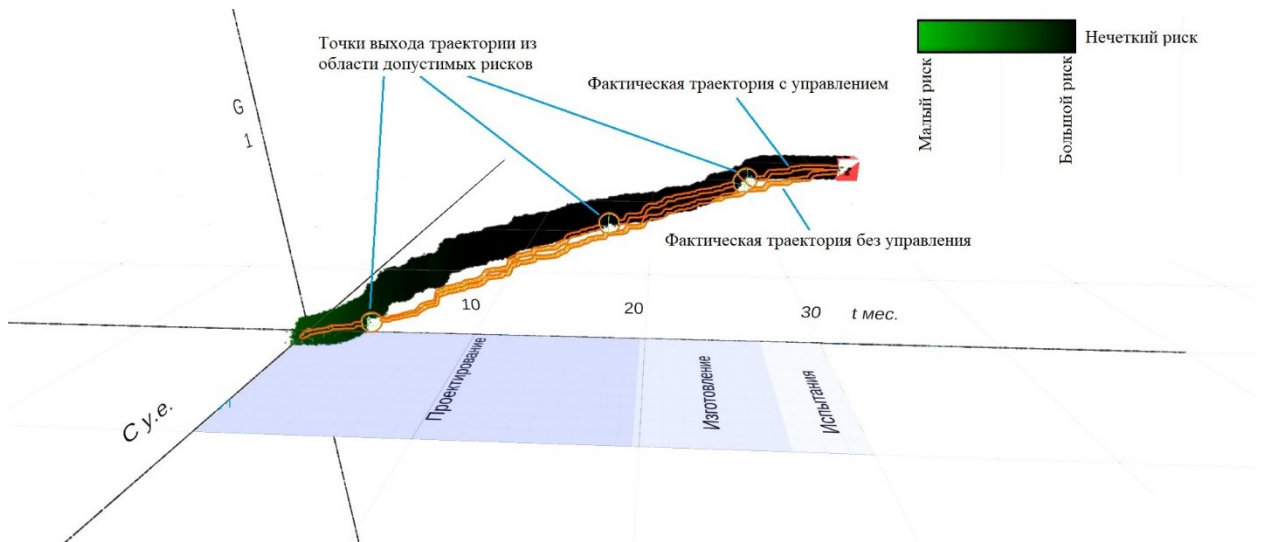
Как было показано в предыдущем параграфе, для сценария Б вероятностные методы недостаточно эффективны. Предлагаемая методика использует нечеткую оценку риска, при которой устойчиво выделяется основная тенденция возмущений. На каждом шаге моделирования система отслеживает положение фактической траектории относительно области допустимого риска. Границы области сужаются динамически с учётом текущего риска и его изменения. При выходе траектории за пределы области срабатывает механизм адаптивного финансирования. Объём дополнительных средств на весь срок разработки не фиксирован. Он косвенно или прямо вычисляется на основе нечетких правил. Это позволяет гибко реагировать на степень отклонения.

Адаптивное финансирование (как комплекс управляющих воздействий) возвращает траекторию разработки в область допустимого риска. В условиях высокой неопределённости меры поддержки направлены на снижение технических и организационных рисков. Такими мерами могут выступать:

- выделение средств на параллельные экспериментальные работы для проверки технологий;
- финансирование расширения испытаний для ускоренного получения обратной связи;
- создание страховых запасов комплектующих с длительным сроком поставки.

В рамках математической модели, реализованной в ПАК, эффект от адаптивного финансирования выражается в корректировке ключевых показателей процесса. Дополнительное финансирование влияет на скорость изменения технической готовности. Конкретный состав и форма указанных мер зависят от специфики предприятия и характера возникших отклонений.

Такой подход позволяет своевременно корректировать ход разработки. Он компенсирует воздействие негативных факторов и возвращает траекторию в допустимую зону. Результаты моделирования сценария Б с применением адаптивного финансирования представлены на рисунке 26 ниже.



Источник: составлено автором.

Рисунок 26 – Оценка риска на основе расчета нечеткой оценки отклонений разработки

На графике видно, что подверженная управлению траектория разработки достигает целевые показатели на 28 месяце (финальное значение G становится равным единице).

Управление осуществлялось следующим образом. Если траектория выходит из области допустимых рисков и предельная эффективность инвестиций η больше порогового значения $\eta_{\text{порог}} = 0,0001$, то осуществляется вливание средств $u = 0,15$. В результате общее суммарное время вне области допустимых рисков снизилось до 15,58, количество выходов 4, общие дополнительные затраты возросли до 0,0779.

На графике видно, что после первого выхода траектории с управлением из области допустимых рисков она начинает отклоняться от траектории без управления в сторону роста технической готовности. Благодаря управлению

траектория раньше возвращается в область допустимых рисков, что позволяет достичь целевых показателей разработки.

Адаптивное финансирование обеспечивает устойчивое возвращение траектории в область допустимого риска и достижение целевых показателей в установленный срок. Сокращение времени пребывания вне допустимой зоны и снижение числа критических выходов показывают, что следование с предложенной методике позволяет оперативно компенсировать отклонения, фиксировать отклонения на ранних этапах разработки, и, тем самым, своевременно начинать дополнительное финансирование.

4.5 Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий Б

Для объективной оценки эффективности разработанной методики адаптивного финансирования был проведён сравнительный анализ результатов моделирования по двум сценариям (А и Б) в двух вариантах: базовом (без управляющих воздействий) и с применением адаптивного финансирования.

В качестве критериев сравнения выбраны следующие показатели:

- суммарное время пребывания траектории разработки вне области допустимого риска;
- количество эпизодов выхода за границы области допустимого риска – число независимых пересечений границы за весь цикл разработки;
- эффективность использования выделенного бюджета – отношение достигнутой итоговой готовности к общим затратам (плановые и дополнительные);
- обеспечение завершения разработки в установленные сроки, (достижения конечной точки траектории к директивному сроку при 100% готовности);
- совокупные затраты на компенсацию возмущений,

характеризующие относительный объём ресурсов, потребовавшийся для удержания траектории в допустимых пределах (для варианта с адаптивным финансированием).

В сценарии А (критическое отклонение) в базовом варианте моделирования фазовая траектория, выйдя за нижнюю границу области допустимого риска в промежуточный момент времени, продолжает неконтролируемо отклоняться. Отклонение принимает необратимый характер: накопленное отставание не компенсируется, и к директивному сроку проект не выходит на требуемый уровень готовности.

В варианте с адаптивным финансированием срабатывание механизма поддержки происходит непосредственно перед пересечением границы риска. Выделенный объём средств позволяет скорректировать траекторию, и она возвращается в допустимую область. Проект завершается в установленный срок при контролируемых совокупных затратах на компенсацию возмущений.

Рассмотрим таблицу 1 с результатами по наиболее сложному для разработчиков сценарию Б. Для краткости будем называть построение области на основе вероятностной оценки рисков – алгоритм А1, построение области на основе фактических отклонений – алгоритм А2, построение области на основе нечеткой оценки отклонений – алгоритм А3, построение области на основе нечеткой оценки отклонений – алгоритм А4.

В сценарии Б целевой показатель технической готовности ($G = 1$) достигнут только при использовании алгоритма А4. Это алгоритм адаптивного финансирования на основе нечеткой оценки риска. Варианты без управления (А1, А2, А3) не вышли на требуемый уровень готовности. Они зафиксировали значение $G = 0,95$.

В базовых вариантах (без управления) наблюдается потеря контроля. Плановые оценки параметров не полностью совпадают с фактическими, интенсивность возмущений повышена. Траектория выходит за границы области допустимого риска с начальных этапов и не возвращается. Время

пребывания вне области допустимых рисков составляет от 14,86 до 22,85 месяца. Проект не завершается в директивные сроки.

Таблица 1 – Результаты эксперимента в сценарии Б

Показатели эффективности	Без управления			С управлением
	Алгоритм А1	Алгоритм А2	Алгоритм А3	Алгоритм А4
Время вне области допустимых рисков (мес.)	14,86	17,2	22,85	15,58
Количество выходов из области (шт.)	11	4	5	4
Объем дополнительного финансирования (у.е.)	0	0	0	0,0779
Достижение целевых показателей ($G = 1$)	Нет. $G = 0,95$	Нет. $G = 0,95$	Нет. $G = 0,95$	Да. $G = 1$
Эффективность использования выделенного бюджета	0,95	0,95	0,95	0,9277

Источник: составлено автором.

Применение адаптивного финансирования (алгоритм А4) позволяет частично компенсировать высокую волатильность. Несмотря на отдельные выходы за границы области риска (суммарно 15,58 месяца), механизм оперативного реагирования возвращает траекторию в допустимые пределы. Количество таких выходов не превышает четырех. Накопление критических отклонений предотвращается. Проект выходит на финальный показатель готовности $G = 1$. Совокупные затраты на адаптивное финансирование составили 0,0779 у.е. Это цена работы в условиях сильной неопределенности.

В варианте с управлением эффективность использования выделенного бюджета составила 0,9277. В вариантах без управления этот показатель выше – 0,95.

Повышение эффективности возможно за счет снижения объема дополнительных ресурсов. При этом важно сохранить гарантированное достижение целевой готовности. Пути повышения эффективности мы рассмотрим ниже.

В таблице 2 представлено сравнение различных конфигураций алгоритма управления. В том числе мы анализируем оптимизацию порогов срабатывания. Тем самым, проводится анализ изменения показателей эффективности при изменении выделяемых средств u (по режиму 1, как показывает параграф 3.6) при выполнении критериев необходимости и целесообразности финансирования.

Таблица 2 – Показатели разработки при различных фиксированных управляющих воздействиях

Показатели эффективности	Алгоритм А4			
	$u = 0,15$	$u = 0,1$	$u = 0,05$	$u = 0,01$
Время вне области допустимых рисков (мес.)	15,58	18,05	20,16	22,08
Количество выходов из области (шт.)	4	3	2	5
Объем дополнительного финансирования (у.е.)	0,0779	0,0602	0,0336	0,0074
Достижение целевых показателей ($G = 1$)	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$
Эффективность использования выделенного бюджета	0,9277	0,943248	0,9674	0,9926

Источник: составлено автором.

Во всех вариантах целевой показатель технической готовности достигнут. Разработка завершилась с $G = 1$. Значит, методика адаптивного финансирования позволяет оптимизировать управляющие воздействия.

Задача оптимизации может быть сведена к нахождению предела этой функции и при стремлении эффективности к 1. В условиях высокой неопределенности необходимо брать управляющие воздействия с некоторым запасом, так как управляющие воздействия $u = 0,01$, которые успешны в одном случае, могут быть бесполезны в другом. Рекомендованное значение зависит от оценки неопределенности, порогового значения предельных инвестиций и доступных средств.

При снижении объема управляющего воздействия с $u = 0,15$ до $u = 0,01$ время пребывания траектории вне области допустимого риска увеличивается. Оно растет с 15,58 до 22,08 месяца. Количество выходов из области меняется не монотонно: от 4 до 2, затем до 5. Объем дополнительного финансирования закономерно уменьшается с 0,0779 до 0,0074 у.е. Эффективность использования выделенного бюджета повышается с 0,9277 до 0,9926.

Меньшие значения u требуют меньше дополнительных ресурсов и дают более высокую бюджетную эффективность. Однако они ведут к большему времени пребывания траектории вне допустимой зоны. Это повышает риск срыва сроков при возможных дополнительных возмущениях. Выбор конкретного u представляет собой компромисс между экономией средств и надежностью удержания проекта в безопасной зоне.

Дальнейшее совершенствование методики направлено на поиск оптимального объема управляющего воздействия. Такой подход позволяет минимизировать затраты при сохранении гарантированного достижения целевой готовности.

Значение u будет вычисляться по формуле 71 так, как это описано в параграфе 3.6. Управление финансированием работает по типу два входа-один выход на основе обратной связи. Рассмотрим таблицу 3.

В таблице 3 показаны результаты для разных настроек нечёткого регулятора. Фактически это разные варианты отображения входных данных

на выход u . При малых u время пребывания вне области риска максимально – 22 месяца. Объём дополнительного финансирования минимален – 0,0074 у.е. При увеличении u до 0,15 время вне области снижается до 15,58 месяца, но объём финансирования растёт до 0,0779 у.е. Во всех вариантах целевые показатели достигнуты ($G = 1$).

Таблица 3 – Показатели разработки при различных адаптивных управляющих воздействиях

Показатели эффективности	Алгоритм А4			
	$u = 0,15$	$u = 0,1$	$u = 0,05$	$u = 0,01$
Время вне области допустимых рисков (мес.)	15,58	18,05	20,2	22,06
Количество выходов из области (шт.)	4	3	3	5
Объём дополнительного финансирования (у.е.)	0,0779	0,0602	0,0337	0,0074
Достижение целевых показателей ($G = 1$)	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$
Эффективность использования выделенного бюджета	0,9277	0,9432	0,9674	0,9926

Источник: составлено автором.

Нечёткое управление даёт несколько преимуществ. Регулятор подстраивает объём финансирования под текущую риск-обстановку. Он не использует фиксированную величину. Такое управление менее восприимчиво к скачкам возмущающих факторов. Гауссовы функции принадлежности сглаживают резкие скачки входных данных. Это позволяет избежать лишних срабатываний при кратковременных возмущениях. Нечеткое управление дает возможность выбирать компромисс между затратами и риском. Из таблицы 3 видно, что оператор может настроить регулятор на более экономный режим

($u = 0,01$) или на режим с меньшим отклонением ($u = 0,15$). При этом во всех случаях разработка завершается успешно.

Таким образом, нечёткое управление даёт дополнительную степень свободы. Оно позволяет адаптироваться к условиям выполнения проекта и выбирать баланс между экономией средств и надёжностью удержания траектории в допустимой области.

4.6 Вычислительный эксперимент для исследования, сценарий Б

Рассмотрим применение предлагаемой методики для конкретного проекта: составной части опытно-конструкторской работы «Разработка составной части аванпроекта Системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный путь» (далее – Системы МП) в части барьерно-сопровождающей радиолокационной станции» в научно-исследовательском институте дальней радиолокации (шифр СЧ ОКР: «АСПОС ОКП-2025» (АП МП)-НИИДАР РЛС-БС» [5]).

«РЛС-БС является составной частью системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный путь» и предназначена для поиска, обнаружения и сопровождения в заданной зоне действия техногенных космических объектов (далее – ТКО), формирования и выдачи потребителям информации о ТКО и помеховой обстановке» [5]. Это импульсная РЛС L-диапазона с полнополяризационным излучением и приемом.

Данная радиоэлектронная система состоит из нескольких частей. Структурная схема деления «ИЗДЕЛИЕ РЛС-БС РЭ система 1М» (предварительная) РНКП.464421.002Е1: «приёмно-передающий (далее – ППК) радиоэлектронный комплекс (далее – РЭК)

1МА (РНКП.464421.003), комплекс обработки и управления РЭК
 1МУ (РНКП468382.001), программное обеспечение
 1МП (РНКП.00010-001), монтажный комплект (РНКП.464941.005), комплект
 запасных частей инструментов и принадлежностей (РНКП464421.0023И)» [5].

Рассмотрим составную часть (далее СЧ1) РЛС-БС 1 очереди (СЧ1 ППК РЭК 1МА). СЧ1 является самой сложной, объемной и наиболее описанной частью всего проекта, так как ППК является основой всей системы.

Проект характеризуется следующими сроками:

1) этап проектирования 01.01.2026 – 02.12.2027 ($T_{пр} = 24$ месяца):
 разработка эскизного проекта РЛС-БС 1 очереди, рекогносцировка мест размещения, разработка рабочей конструкторской и программной документации РЛС-БС;

2) этап изготовления 03.12.2027 – 02.01.2033 ($T_{из} = 61$ месяц):
 изготовление РЛС-БС 1 очереди;

3) этап испытаний 03.01.2033 – 03.11.2033 ($T_{ис} = 11$ месяцев):
 проведение предварительных и государственных испытаний РЛС-БС 1 очереди, корректировка рабочей конструкторской и программной документации по результатам предварительных и государственных испытаний. Ввод в эксплуатацию.

Начальная готовность проекта $G(0) = 0$.

Совокупный объем задействованных финансовых ресурсов 17 231 215,68 тыс. рублей.

Рассчитаем коэффициенты: коэффициент адаптации a , оптимальная скорость разработки b , коэффициент преобразования финансовых ресурсов в скорость изменения готовности модели c (22) согласно данным из документа [5] акционерного общества «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца».

Функция совокупного объема средств представляется как кусочно-заданная функция (у.е. = 10 млрд рублей):

$$C(G(t)) = \begin{cases} 1,6728016, G \in [0; 0,142) \\ 1,3683042, G \in [0,142; 0,285) \\ 1,0638067, G \in [0,285; 0,428) \\ 0,7593093, G \in [0,428; 0,571) \\ 0,4548119, G \in [0,571; 0,714) \\ 0,1503144, G \in [0,714; 0,857) \\ 0,0113499, G \in [0,857; 1) \\ 0, G = 1 \end{cases} \quad (72)$$

СЧ1 ППК РЭК 1МА следующие подсистемы и компоненты РЛС, подлежащих разработке : антенный элемент (модуль 9ДМ 112-02), приемо-передающий комплекс РЭК 1У06А1-ВП (Изделие 113Ж6), инженерное оборудование приёмо-передающего комплекса (изделие 113Ж6 –инженерный комплекс частотно-зависимой части (далее – ИК ЧЗЧ) 1У01Е1-2) и радиопрозрачное укрытие РЭК 2 6НАР (изделие 145Ж6).

В качестве коэффициента унификации Y , среднего показателя, отражающего долю унифицированных (стандартизированных, заимствованных) решений в проекте, примем синонимичный коэффициент сопоставимости из документа ОКР РЛС-БС. Антенный элемент 9ДМ 112-02 $Y_1 = 1$, ППК РЭК 1У06А1 $Y_2 = 0,33$, инженерный комплекс ИК ЧЗЧ $Y_3 = 0,2$, радиопрозрачное укрытие РЭК 2 6НАР $Y_4 = 2,23$.

Расчет стоимости нормо-часа проведен при среднегодовом месячном фонде рабочего времени ($F_{\text{раб}}$) на период 2025-2036 гг., равном 164,9 часа.

По данным аванпроекта средняя численность конструкторско-технологического персонала ($N_{\text{констр}}$) составляет 90 человек на этапе проектирования.

По данным аванпроекта в формуле (24) величина в формуле (73)

$$\frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{фс}}} T_{\text{норм}j}}{N_{\text{фс}}} \quad (73)$$

принимает значение 14400 часов.

С учетом этого получаем значение коэффициента оптимальной разработки на этапе проектирования по формуле (74)

$$b = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_i \cdot 90 \cdot 164,9}{4 \cdot 14400} \approx 0,9687. \quad (74)$$

Далее, находим значение коэффициента адаптации (скорость проектной деятельности) на этапе проектирования по формуле (75)

$$a_1 = \frac{0,9687}{24} \approx 0,0403 \quad (75)$$

и штраф за перегрузку по формуле (76)

$$a_2 = \frac{4}{\sum_{i=1}^4 Y_i} = 1,0638. \quad (76)$$

Так как в аванпроекте нет детализированных условий по взаимодействию с предприятиями, а выбраны только контрагенты, то на этапе изготовления сложно учитывать точное доступное время работы производственных линий. Коэффициент оптимальной разработки на этапе проектирования по формуле (77) будет вычисляться аналогично формуле (29)

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{ПГ}i} V_{\text{max}i}}{n}. \quad (77)$$

Коэффициент технологической готовности производств $k_{ПГ}$ будем считать пропорционально унификации компонентов СЧ1 (при превышении единицы коэффициента сопоставимости $k_{ПГ}$ примем за единицу).

Максимум производства будем рассчитывать по формуле (78)

$$V_{max} = \frac{T_{из}}{\frac{LI}{N_p}}, \quad (78)$$

где LI – трудоемкость изготовления, монтажа и сдачи (чел./мес.);

N_p – количество квалифицированных рабочих.

Известно, что СЧ 1 ППК РЛС-БС состоит из следующих частей [5]:

- антенный элемент 9ДМ 112-02 – 23040 шт.;
- ППК 180 сборочных единиц (далее – сб. ед.);
- инженерное оборудование ППК – 1 сб. ед.;
- радиопрозрачное укрытие РЛС-БС – 1 шт.

Суммарная трудоемкость изготовления, монтажа, сдачи по техническим условиям (далее – ТУ) 23040 штук компонентов 9ДМ 112-02: $LI_1 = 0,0243 \cdot 23040 \cdot 1 = 560,33$ чел./мес.

Суммарная трудоемкость изготовления, монтажа, сдачи по ТУ 180 сб. ед. ППК РЭК 1У06А1-ВП РЛС-БС $LI_2 = 8,61 \cdot 180 \cdot 0,33 = 511,43$ чел./мес.

Суммарная трудоемкость изготовления, монтажа, сдачи по ТУ 1 сб. ед. ИК ЧЗЧ РЛС-БС $LI_3 = 2500 \cdot 1 \cdot 0,2 = 500$ чел./мес.

Суммарная трудоемкость изготовления, монтажа, сдачи по ТУ укрытия РЭК 2 6НАР РЛС-БС 1 шт. $LI_4 = 246,636 \cdot 1 \cdot 2,23 \approx 550$ чел./мес.

Тогда на этапе изготовления $b \approx 0,9448$. По формулам (30) и (31) найдем коэффициенты гибкости производства по формуле (79) и монтажа по формуле (80)

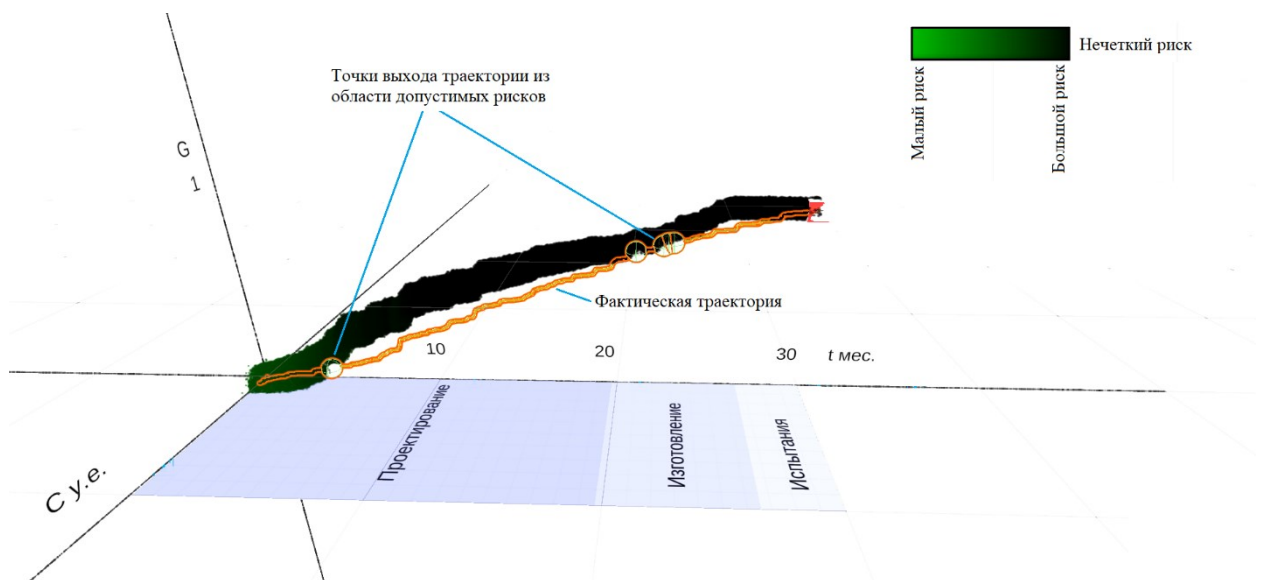
$$a_1 = \frac{0,9448}{61} \approx 0,0154, \quad (79)$$

$$a_2 = \frac{1}{0,94} \approx 1,0638. \quad (80)$$

Для этапа испытаний полагаем: $b = 1$, $a_1 = 0,5$, $a_2 = 1$, $c = 0,2$.

Возмущающие факторы $\varepsilon(t)$ описываются нормальным распределением с параметрами $\mu = 2,8$ и $\sigma = 1$.

Результат расчета директивной траектории показан на рисунке 27 с возможной областью допустимых рисков.



Источник: составлено автором.

Рисунок 27 – График рассчитанной директивной траектории разработки с гипотетической областью допустимых рисков

Выводы по главе 4.

Численное моделирование подтверждает работоспособность и высокую эффективность разработанной методики адаптивного финансирования. В рассмотренных сценариях её применение обеспечивает лучшее управление процессом разработки в сравнении с базовым подходом.

Методика позволяет своевременно идентифицировать момент выхода траектории за пределы области допустимого риска, инициирующие корректирующее воздействие, сокращающее время пребывания проекта в опасной зоне.

Если отклонения носят необратимый характер, адаптивное финансирование возвращает процесс в управляемое русло, предотвращая срыв сроков разработки.

Предложенный подход демонстрирует устойчивость в условиях сильной неопределенности, где традиционные методы планирования и оценки рисков теряют прогностическую способность. Способность адаптироваться к непредсказуемым возмущениям подтверждает практическую значимость разработанного аппарата.

Совокупные затраты на реализацию адаптивных воздействий остаются в контролируемых пределах. Они являются платой за обеспечение выполнения проекта в условиях, изначально неблагоприятных для его успешного завершения.

Разработанная методика адаптивного финансирования реализована в программно-аппаратном комплексе. Методика представляет собой эффективный инструмент управления рисками создания сложных технических систем и превосходит по своим характеристикам традиционные подходы, особенно в условиях высокой неопределенности исходных данных и внешней среды.

Заключение

В рамках проведенного исследования разработаны модель разработки РЛС и методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, обеспечивающие в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов достижение целевых показателей разработки РЛС-БС. Модель учитывает особенности и специфику разработки РЛС: различные этапы ЖЦ, изменение параметров возмущающих факторов во времени, учет управляющих воздействий, нелинейных свойств и иных особенностей. В отличие от известных подходов, предложенное описание процесса в виде фазовых и кинетических траекторий позволяет наглядно отслеживать динамику готовности и бюджета. Разработанная модель и методика могут служить основой для постановки и решения более сложных задач в области управления созданием сложных технических систем, таких как оптимизация распределения ресурсов между несколькими взаимосвязанными проектами и прогнозирование критических отклонений на ранних стадиях разработки.

В рамках методики определен комплексный показатель риска на основе мягких вычислений, что позволяет адекватно оценивать состояние разработки в условиях сильной неопределенности. Применение аппарата нечёткой логики обеспечивает успешное и гарантированное управление даже при дефиците исходных данных. Определены правила, которые позволяют строить область допустимых рисков с динамически меняющимися границами на основе текущих значений риска и его динамики. Определены и заданы критерии необходимости и целесообразности финансирования, а также определен аппарат для вычисления объема дополнительных субсидий.

Практическая значимость работы состоит в готовности разработанной методики к внедрению в процессы управления проектами предприятий промышленного сектора на основе сформулированных рекомендаций и созданного программно-аппаратного комплекса. Результаты вычислительного

эксперимента подтверждают, что адаптивное финансирование позволяет достичь целевой технической готовности в установленные сроки даже при высокой неопределенности и дефиците исходных данных.

Модель и методика могут быть использованы для стратегического планирования этапов жизненного цикла, проектирования системы мониторинга и решения задач обоснования целесообразности дополнительных инвестиций.

Поставленная цель диссертации достигнута, задачи решены.

Список сокращений и условных обозначений

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения и обозначения:

БЗО – барьерная зона обзора;

ВПК – военно-промышленный комплекс;

ДО – дальнего обнаружения;

ДУ – дифференциальное уравнение;

ЖЦ – жизненный цикл;

ЗИП-О – комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей одиночный;

ИК ЧЗЧ – инженерный комплекс частотно-зависимой части;

МКП – мониторинг космического пространства;

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;

НПОДАР – акционерное общество «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца»;

ОКП – околоземное космическое пространство;

ПАК – программно-аппаратный комплекс;

ППК – приёмо-передающий комплекс;

РЛС – радиолокационная станция;

РЛС-БС – барьерно-сопровождающая радиолокационная станция;

РЭК – радиоэлектронный комплекс;

сб. ед. – сборочная единица;

САПР – система автоматизированного проектирования;

СЧ – составная часть;

ТЗ – техническое задание;

ТКО – техногенные космические объекты;

ТТХ – тактико-технические характеристики,

ТУ – технические условия.

Список литературы

Нормативные правовые акты

1. Об утверждении классификатора программно-аппаратных комплексов и Правил применения классификатора программно-аппаратных комплексов : [приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 31 января 2023 г. № 62 : зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 13 апреля 2023 г., регистрационный № 72994] / Официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru). – Текст : электронный. – URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 26.04.2026).

Стандарты

2. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – Введ. 2020-03-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – Текст : электронный. – URL: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/gost-r-iso-31000-2019.pdf> (дата обращения: 26.05.2026).

3. ГОСТ Р 51901.1–2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем (с изменением № 1). – Введ. 2003-09-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – Текст : электронный. – <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=387384> (дата обращения: 26.05.2026).

4. ГОСТ Р 58771–2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска (IEC 31010:2019, NEQ). – Введ. 2020-03-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – Текст : электронный. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293724/4293724640.pdf> (дата обращения: 26.05.2026).

Отчёты о научно-исследовательской работе

5. Предварительное технико-экономическое обоснование создания и эксплуатации РЛС-БС : Пояснительная записка : Книга 7 / Акционерное общество «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца» ; главный конструктор изделия И. В. Тютин. – Москва, 2025. – 123 с. – РНКП.464421.002П37. – Текст : непосредственный.

Электронные ресурсы

6. AIML : [программный код] / Air-Labs. – Текст : электронный. – URL: <https://github.com/air-labs/AIML> (дата обращения: 27.04.2026).

Книги

7. Блауг, М. Экономическая мысль в ретроспективе = Economic Theory in Retrospect / М. Блауг. – 4-е издание. – Москва : Академия народного хозяйства : Дело, 1994. – 720 с. – ISBN 5-86461-151-4.

8. Боев, С.Ф. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения. Разработка, испытания и функционирование / С.Ф. Боев, А.П. Герасименко, А.О. Жуков [и др.] ; под редакцией С.Ф. Боева. – Москва : Радиотехника, 2013. – 168 с. – ISBN 978-5-88070-358-6.

9. Боев, С.Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения / С.Ф. Боев. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 430 с. – ISBN 978-5-7038-4775-6.

10. Боев, С.Ф. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения : монография / С.Ф. Боев, А.А. Рахманов, А.П. Линкевичус [и др.]. – Москва : Научная книга, 2019. – 420 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-6043289-0-3.

11. Бураков, М. В. Системы искусственного интеллекта : учебное пособие / М.В. Бураков. – Москва : Проспект, 2017. – 440 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-392-20655-1.
12. Зеликин, М.И. Однородные пространства и уравнение Риккати в вариационном исчислении / М.И. Зеликин. – Москва : Факториал, 1998. – 351 с. – ISBN 5-88688-022-4.
13. Куржанский, А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / А.Б. Куржанский. – Москва : Наука, 1977. – 392 с. – ISBN отсутствует.
14. Малинецкий, Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 360 с. – ISBN 5-354-00081-5.
15. Маццукато, М. Предпринимательское государство / М. Маццукато ; перевод с английского М. Добряковой. – Москва : Издательство дом Высшей школы экономики, 2023. – 360 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-7598-2535-7.
16. Мински, Х. Стабилизируя нестабильную экономику / Х. Мински ; перевод с английского Ю. Каптуревского ; под научной редакцией И.В. Розмаинского. – Москва ; Санкт-Петербург : Издательство Института Гайдара : Факультет свободных искусств и наук СПбГУ, 2017. – 624 с. – ISBN 978-5-93255-470-8.
17. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат ; перевод с английского. – 4-е издание, электронное. – Москва : Лаборатория знаний, 2020. – 801 с. – ISBN 978-5-00101-742-4.
18. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – 4-е издание, стереотипное. – Москва : Наука, 1983. – 392 с. – ISBN отсутствует.
19. Черноусько, Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько. – Москва : Наука, 1988. – 320 с. – ISBN 5-02-013899-1.

20. Ширяев, А.Н. Основы стохастической финансовой математики : монография : в 2 томах. Том 1. / А.Н. Ширяев. – 2-е издание, исправленное. – Москва : ФАЗИС, 2004. – 440 с. – Тираж отсутствует. – ISBN 5-7036-0092-8.

Статьи

21. Боев, С.Ф. Метод повышения эффективности внедрения новых технологий при создании РЛС нового поколения / С.Ф. Боев, А.А. Рахманов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 73-81. – ISSN 1999-9429.

22. Боев, С.Ф. Событийная модель оценки рисков создания радиолокационных станций дальнего обнаружения / С.Ф. Боев, А.М. Петраков, Д.Н. Дембицкий [и др.] // Труды МАИ. – 2015. – № 80. – С. 23. – eISSN 1727-6942. – Текст : электронный.

23. Боев, С.Ф. О возможности снижения сроков и стоимости создания РЛС ДО с использованием стенда главного конструктора / С.Ф. Боев, А.П. Линкевичиус, А.С. Логовский, С.В. Якубовский // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 9. – С. 14. – eISSN 1684-1719.

24. Боев, С.Ф. Управление процессами создания РЛС ДО функционально-блочной структуры / С.Ф. Боев, А.С. Логовский // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 7. – С. 11. – eISSN 1684-1719.

25. Боев, С.Ф. Создание и эксплуатация радиолокационных станций дальнего обнаружения / С.Ф. Боев, А.А. Рахманов, А.П. Линкевичиус [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 5. – С. 35-48. – ISSN 2218-5453.

26. Болтянский, В.Г. Теория оптимальных процессов. I. Принцип максимума / В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Л.С. Понтрягин // Известия Российской академии наук. Серия математическая. – 1960. – № 1. Том 24. – С. 3-42. – ISSN 0373-2436.

27. Бондаренко, А.П. Обобщенный показатель для обоснования конструктивно-технических решений радиолокационных станций на этапе концептуального проектирования / А.П. Бондаренко, С.Д. Сапрыкин, К.С. Соколов, А.М. Казанцев // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2023. – № 3 (128). – С. 70-75. – ISSN 2075-3608.

28. Босов, А.В. Методика оценки производственных рисков разработки средств вооружения и военной техники / А.В. Босов, А.А. Крюков // Системы и средства информатики. – 2021. – № 3. Том 31. – С. 88-100. – ISSN 0869-6527.

29. Будко, Н.П. Модель превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций / Н.П. Будко, О.В. Крюков, А.А. Южакова // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 2. – С. 138-242. – ISSN 2410-9916.

30. Гамкрелидзе, Р.В. Оптимальные процессы управления при ограниченных фазовых координатах / Р.В. Гамкрелидзе // Известия Российской академии наук. Серия математическая. – 1960. – № 3. Том 24. – С. 315-356. – ISSN 0373-2436.

31. Гамкрелидзе, Р.В. О скользящих оптимальных режимах / Р.В. Гамкрелидзе // Доклады Академии наук СССР. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1962. – № 6. Том 143. – С. 1243-1245. – ISSN 0002-3264.

32. Гамкрелидзе, Р.В. Скользящие режимы в теории оптимального управления / Р.В. Гамкрелидзе // Труды Математического института имени В.А. Стеклова. – 1985. – Том 169. – С. 180-193. – ISSN 0371-9685.

33. Допира, Р.В. Методика управления разработкой сложных технических систем / Р.В. Допира, Р.Ю. Кордюков, А.А. Беглецов [и др.] // Программные продукты и системы. – 2014. – № 2. – С. 17-22. – ISSN 0236-235X.

34. Елсуков, П.Ю. Логистическая модель жизненного цикла сложной системы / П.Ю. Елсуков, В.Я. Цветков // ИТНОУ: информационные

технологии в науке, образовании и управлении. – 2018. – № 1 (5). – С. 71-78. – ISSN 2413-6107.

35. Захаров, А.С. Система поддержки принятия решения диспетчера ситуационного центра при аварийных изменениях уровня энергопотребления на основе метода сглаживания / А.С. Захаров, Д.А. Шарипов, С.В. Мацеевич [и др.] // Динамика сложных систем – XXI век. – 2025. – № 5. Том 19. – С. 69-76. – ISSN 1999-7493.

36. Клейнер, Г.Б. Новая теория экономических систем и ее приложения / Г.Б. Клейнер // Вестник Российской академии наук. – 2011. – № 9. Том 81. – С. 794-811. – ISSN 0869-5873.

37. Князев, В.В. Вопросы формализации задачи научного исследования / В.В. Князев // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2019. – № 3. – С. 61-69. – ISSN 1991-5950.

38. Коновальчик, А.П. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР / А.П. Коновальчик, М.Ю. Конопелькин, А.О. Щирый, А.А. Арутюнян // Вестник воздушно-космической обороны. – 2020. – № 4 (28). – С. 111-118. – ISSN 2311-830X.

39. Кричевский, М.Л. Оценка рисков инновационного проекта / М.Л. Кричевский, Ю.А. Козлова // Управление риском. – 2013. – № 2. – С. 2-7. – ISSN 1684-6311.

40. Ленихин, А.М. Концепция риск-анализа технических систем с использованием цифровых двойников / А.М. Ленихин, Н.А. Махутов, Ю.И. Шокин, А.В. Юрченко // Вычислительные технологии. – 2020. – № 4. Том 25. – С. 99-113. – ISSN 1560-7534.

41. Литвинов, С.В. Структура построения приемного комплекса РЛС загоризонтного обнаружения / С.В. Литвинов, И.А. Глинкин, Ю.М. Власов // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн : материалы Всероссийской открытой научной конференции. –

Муром : Муромский институт (филиал) ВлГУ, 2021. – С. 358-366. – ISBN отсутствует.

42. Львович, В.В. Управление инвестиционным процессом на основе адаптации нечеткой имитационной модели / В.В. Львович, С.М. Яскевич // Экономика и управление. – 2019. – № 3 (157). – С. 45-51. – ISSN 1998-1627.

43. Макаров, В.Л. Агент-ориентированная модель для мониторинга и управления реализацией больших проектов / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Экономика и управление. – 2017. – № 4 (138). – С. 4-12. – ISSN 1998-1627.

44. Макаров, В.Л. Системные основы решения управленческих задач взаимодействия фундаментальной и прикладной науки с производственным сектором как основной фактор новой индустриализации России / В.Л. Макаров, А.И. Агеев, В.А. Зеленский, Е.Л. Логинов // Экономические стратегии. – 2013. – № 2. – С. 108-117. – ISSN 1680-094X.

45. Матюшок, С.В. Управление отклонениями в проектно-ориентированной компании / С.В. Матюшок // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. – 2012. – № 2. – С. 98-107. – ISSN 2313-2329.

46. Нуреев, Р.М. «Общая теория занятости, процента и денег» Дж.М. Кейнса: предпосылки возникновения, методология и особенности интерпретации / Р.М. Нуреев // Журнал институциональных исследований. – 2016. – № 1. Том 8. – С. 6-35. – ISSN 2076-6297.

47. Петрухин, Б.М. О рациональном использовании количественного уровня риска в управлении стратегическими программами инновационного развития / Б.М. Петрухин, А.С. Томшин // ИТ-СТАНДАРТ. – 2025. – № 2 (43). – С. 93-104. – eISSN 2949-0529.

48. Подольский, А.Г. К вопросу о военно-экономической эффективности использования финансовых ресурсов при планировании

создания продукции военного назначения / А.Г. Подольский, Г.А. Лавринов // Вооружение и экономика. – 2012. – № 2 (18). – С. 38-52. – eISSN 2071-0151.

49. Полтева, Т.В. Измерение проектных рисков статистическими показателями / Т.В. Полтева // Карельский научный журнал. – 2017. – № 4 (21). Том 6. – С. 275-279. – ISSN 2311-0104.

50. Понтрягин, Л.С. Оптимальные процессы регулирования / Л.С. Понтрягин // Успехи математических наук. – 1959. – № 1 (85). Том 14. – С. 3-20. – ISSN 0042-1316.

51. Сучков, К.И. Об интерпретации результатов испытаний компонентов радиолокационных станций при оценке рисков ее создания / К.И. Сучков // Труды МАИ. – 2015. – № 81. – С. 24. – ISSN 1727-5900.

52. Трундаев, И.В. Моделирование траекторного движения к цели в условиях неопределенности / И.В. Трундаев // Нелинейный мир. – 2024. – № 4. Том 22. – С. 70-79. – ISSN 2070-0970.

53. Трундаев, И.В. Мягкое управление нелинейной экономической системой / И.В. Трундаев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2025. – № 1 (53). – С. 84-100. – ISSN 2227-8486.

54. Трундаев, И.В. Формализация процесса разработки бортовой радиолокационной станции фазовой траекторией в допустимой области значений с учетом неопределенности данных о технической готовности ее компонентов и порядке финансирования / И.В. Трундаев, В.А. Панкратов, С.П. Соляникова, С.С. Михайлова // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2025. – № 4. – С. 164-175. – ISSN 0579-2975.

55. Трундаев, И.В. Модель финансирования разработки информационно-управляющих систем на основе многокритериального анализа данных / И.В. Трундаев, В.Б. Гисин, А.В. Тимошенко, В.А. Панкратов // Финансы: теория и практика. – 2026. – № 1. Том 30. – С. 93-102. – ISSN 2587-5671.

56. Трундаев, И.В. Методика оценки рисков при разработке радиолокационной станции мониторинга космического пространства на основе адаптивного финансового управления / И.В. Трундаев, В.В. Харитонов, В.А. Панкратов // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. – 2026. – № 1. – С. 59-65. – ISSN 2410-4124.

57. Фиров, Н.В. Методика оперативной оценки военно-экономической целесообразности разработки образцов вооружения, военной и специальной техники с заданными тактико-техническими характеристиками / Н.В. Фиров // Вооружение и экономика. – 2025. – № 4 (74). – С. 68-76. – eISSN 2071-0151.

58. Фомин, Д.А. Научно-технический прогресс: инвестиционная составляющая / Д.А. Фомин // Terra Economicus. – 2022. – № 1. Том 20. – С. 52-64. – ISSN 2073-6606.

59. Цуцурина, А.А. Уравнение Ферхюльста: качественный анализ / А.А. Цуцурина, Т.Н. Матыцина, К.Е. Ширяев // Актуальные проблемы преподавания информационных и естественно-научных дисциплин : Материалы XIII Всероссийской научно-методической конференции, Кострома, 22 апреля 2019 года. – Кострома : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Костромской государственный университет», 2019. – С. 178-181. – ISBN 978-5-8285-1017-7.

60. Авдошин, С.М. Формирование портфеля проектов на основе нечеткой модели многокритериальной оптимизации / С.М. Авдошин, А.А. Лифшиц // Бизнес-информатика. – 2014. – № 1 (27). – С. 14-22. – ISSN 1998-0663

61. Ширяев, В.И. Гарантированный подход к управлению предприятием с помощью цифрового двойника в условиях неполноты информации / В.И. Ширяев, А.А. Брагина // Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023 (ЦИСП 2023) : сборник научных статей. –

Челябинск : Издательский центр Южно-Уральского государственного университета, 2024. – С. 527-538. – ISBN 978-5-696-05449-0.

Источники на иностранном языке

62. Arutyunov, A.V. Maximum principle in problems with mixed constraints under weak assumptions of regularity / A.V. Arutyunov, D.Y. Karamzin, F.L. Pereira // Optimization. – 2010. – № 7. Volume 59. – P. 1067-1083. – ISSN 0233-1934.

63. Castro, J.L. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators / J.L. Castro, M. Delgado // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 1996. – № 1. Volume 26. – P. 149-152. – ISSN 1083-4419.

64. Crama, P. Step by step. The benefits of stage-based R&D licensing contracts / P. Crama, B. De Reyck, Z. Degraeve // European Journal of Operational Research. – 2013. – № 3. Volume 224. – P. 572-582. – ISSN 0377-2217.

65. Cybenko, G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function / G. Cybenko // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 1989. – № 4. Volume 2. – P. 303-314. – ISSN 0932-4194.

66. Dehaghani, N.B. Quantum pontryagin neural networks in gamkrelidze form subjected to the purity of quantum channels / N.B. Dehaghani, A.P. Aguiar, R. Wisniewski // IEEE Control Systems Letters. – 2023. – Volume 7. – P. 2227-2232. – ISSN 2475-1456.

67. Dubois, D. Fuzzy sets and systems: theory and applications / D. Dubois, H. Prade. – New York : Academic Press, 1980. – Volume 144. – 393 p. – ISBN 0122227506.

68. Gamkrelidze, R.V. On some extremal problems in the theory of differential equations with applications to the theory of optimal control /

R.V. Gamkrelidze // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Series A: Control. – 1965. – № 1. Volume 3. – P. 106-128. – ISSN 0887-4603.

69. Jia, B. An integrated risk assessment framework for aircraft systems based on system-theoretic process analysis and fuzzy linguistic consensus decision-making / B. Jia, Y. Gao // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2026. – Volume 165. – P. 113428. – ISSN 0952-1976.

70. Kosko, B. Fuzzy Systems as Universal Approximators / B. Kosko // IEEE Transactions on Computers. – 1994. – № 11. Volume 43. – P. 1329-1333. – ISSN 0018-9340.

71. Lee, S. An Analysis of the Applicability of Technical Risk Index in the Weapons System Research & Development Projects / S. Lee, M. Kim // Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology. – 2017. – № 6. Volume 20. – P. 835-843. – ISSN 1598-9127.

72. Leshno, M. Multilayer feedforward networks with a nonpolynomial activation function can approximate any function / M. Leshno, V.Y. Lin, A. Pinkus, S. Schocken // Neural Networks. – 1993. – № 6. Volume 6. – P. 861-867. – ISSN 0893-6080.

73. Pan, X. A fuzzy synthetic evaluation method for failure risk of aviation product R&D project / X. Pan, H. Wang, W. Chang // 2010 IEEE International Conference on Management of Innovation & Technology. – 2010. – P. 1106-1111. – ISBN 978-1-4244-6543-2.

74. Pinkus, A. Approximation theory of the MLP model in neural networks / A. Pinkus // Acta Numerica. – 1999. – Volume 8. – P. 143-195. – ISSN 0962-4929.

75. Schinasi, K.V. Defense Acquisitions: Space-Based Radar Effort Needs Additional Knowledge Before Starting Development / K.V. Schinasi. // Washington, D.C. : U.S. Government Accountability Office. – 2004. – 43 p. – ISSN отсуствует.

76. Sheu, Y. Continuous time and dynamic suicide attempt risk prediction with neural ordinary differential equations / Y. Sheu, J. Simm, B. Wang [et al.] //

npj Digital Medicine. – 2025. – № 1. Volume 8. – P. 161. – ISSN 2398-6352.

77. Wang, L.X. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning / L.X. Wang, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1992. – № 5. Volume 3. – P. 807-814. – ISSN 1045-9227.

78. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning–I / L.A. Zadeh // Information Sciences. – 1975. – № 3. Volume 8. – P. 199-249. – ISSN 0020-0255.

79. Zohoori, B. Monitoring production time and cost performance by combining earned value analysis and adaptive fuzzy control / B. Zohoori, A. Verbraeck, M. Bagherpour, M. Khakdaman // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Volume 127. – P. 805–821. – ISSN 0360-8352.