На правах рукописи



Болдинов Алексей Максимович

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД»

Специальность
2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: **Привалов Андрей Андреевич**
доктор военных наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сикарев Игорь Александрович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург;

Евглевская Наталья Валерьевна
кандидат технических наук, доцент факультета безопасности информационных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург;

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б

Защита состоится «22» декабря 2026 г., в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования (ФГАОУ ВО) «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А и на сайте университета https://dissov.guap.ru/defense/boldinov_am.

Автореферат разослан «09» ноября 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.384.01
кандидат технических наук, доцент А. М. Сергеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Современный этап развития железнодорожного транспорта Российской Федерации характеризуется масштабной цифровизацией и внедрением систем высокой автоматизации перевозочного процесса. Ключевую роль в этой трансформации играют транспортные киберфизические системы (ТКФС), объединяющие физические компоненты (подвижной состав, инфраструктуру, устройства автоматики) и вычислительные подсистемы (центры управления, платформы обработки данных).

Центральным элементом ТКФС является телекоммуникационная сеть (ТКС), выполняющая функцию «цифровой нервной системы» и обеспечивающая сквозную связь в замкнутом управляющем контуре. От качества функционирования ТКС напрямую зависят своевременность, целостность и доступность доставки управляющих команд – параметры, критически важные для безопасности движения поездов.

Нарушение процесса передачи данных приводит к задержкам или потерям передаваемых данных, что в условиях высокой автоматизации может вызвать дестабилизацию перевозочного процесса, а в крайних случаях – аварии и катастрофы.

ТКФС, как часть интеллектуальной транспортной системы железнодорожного транспорта (ИТС ЖДТ), а также её телекоммуникационная сеть, в соответствии с Федеральным законом № 187 – ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» официально отнесены к объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ). В ФЗ подчёркивается, что воздействие на сети связи объектов КИИ дестабилизирующих факторов, обусловленных наличием внутренних или внешних источников, как правило, приводит к нарушению или полному прекращению функционирования объекта.

Под дестабилизирующими факторами понимаются любые события или действия, вызывающие снижение качества функционирования сети, включая, но не ограничиваясь: отказами оборудования, сбоями программного обеспечения, кибервоздействиями, несанкционированным физическим доступом к сетевым элементам. Необходимо отметить устойчивый рост числа внешних дестабилизирующих факторов на инфраструктуру ОАО «РЖД». Их цель – не компрометация данных, а нарушение самого процесса их передачи, что при высокой автоматизации перевозочного процесса приведёт к деградации ключевых свойств ТКС: доступности, целостности и, прежде всего, своевременности доставки команд управления.

В ходе исследования выявлены следующие **противоречия**:

– практическое – несмотря на наличие многочисленных стандартов и нормативных документов в области обеспечения устойчивости КИИ,

вопросы обеспечения функционирования систем управления ТКС остаются недостаточно проработанными. Это обусловлено тем, что такие системы обладают особой спецификой функционирования, отличающей их от типовых информационных систем: ТКС представляет собой автоматизированную систему управления, непосредственно обеспечивающую устойчивость системы управления объектами КИИ;

– теоретическое – несмотря на наличие нормативных требований к качеству функционирования ТКС, отсутствуют инструменты для проведения её оценки, в частности модели, методики и методы, позволяющие количественно оценивать качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» с учётом влияния совокупности дестабилизирующих факторов.

Степень разработанности темы. Описание ТКФС было проведено в работах Лёвина Б. А., Розенберга И. Н., Цветкова В. Я., Козлова А. В. и др. Работы Корниенко А. А., Попова П. В., Ададурова С. Е., Яковлева В. В., Кулишкина В. А., Ярочкина В. И., Хорева А. А. и др. затрагивали вопросы, связанные с противодействием дестабилизирующим процессам. Описанием дестабилизирующих факторов занимались Привалов А. А., Лаута О. С., Евглевская Н. В и др. Оценка длительности управления ТКС в нестационарных условиях рассматривалась в работах Привалова А. А., Вандича А. П., Буренина А. Н. и др. Оценка качества функционирования телекоммуникационных сетей была проведена в работах Левакова А. К., Привалова А. А. и др.

Несомненно, указанные исследования обладают значительной научной и практической ценностью в области анализа процессов функционирования телекоммуникационных сетей в условиях внешних факторов. Однако в условиях внедрения современных ТКС, вопросы, связанные с оценкой качества их функционирования, остаются недостаточно изученными. Это обусловлено принципиальными особенностями функционирования и спецификой архитектуры ТКС ТКФС от традиционных информационно-телекоммуникационных систем.

Цель и задачи исследования. Цель исследования заключается в повышении качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведён анализ условий функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».
2. Проведён анализ дестабилизирующих факторов в отношении ТКС ТКФС ОАО «РЖД».
3. Разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.
4. Разработана методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

5. Разработаны научно-технические предложения по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Объектом исследования является ТКС ТКФС ОАО «РЖД», под которой понимается многоуровневая гетерогенная инфраструктура, обеспечивающая передачу управляющих, диагностических и служебных данных между физическими объектами и центрами управления. Эта сеть является элементом КИИ и предназначена для управления перевозочным процессом при высоких уровнях автоматизации.

Предметом исследования являются модели и методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Научная задача сформулирована следующим образом: на основе анализа условий функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» разработать методику оценки качества функционирования и научно-технические предложения по сокращению времени передачи данных по управлению объектами ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Модель отличается представлением процесса функционирования в виде укрупнённой смешанной стохастической сети, которая учитывает передачу данных различных категорий срочности по разнородным каналам связи, функционирование узлов коммутации в условиях дестабилизирующих факторов и восстановление работоспособности сетевых элементов и сети в целом. Модель позволяет выявлять новые закономерности функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в изменившихся условиях.

2. Разработана методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Данная методика отличается использованием в качестве обобщённого показателя – вероятности доставки данных за время не более заданного, учитывает особенности функционирования ТКС в условиях внешних и внутренних факторов, позволяет осуществлять обоснованный выбор мероприятий по восстановлению работоспособности ТКС и количественно оценивать качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

3. Разработаны научно-технические предложения по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, отличающиеся обоснованным выбором мероприятий повышения качества функционирования, включающие:

– вариант организации структуры выделенной ТКС на базе технологии MPLS L3VPN, обеспечивающей строгую сегментацию трафика и изоляцию критических потоков управления;

– структуру программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений ТКС ТКФС ОАО «РЖД» (СМИППР), способной в режиме реального времени обнаруживать дестабилизирующие процессы, проводить оценку и прогнозировать качество функционирования ТКС.

Реализация предложений позволяет должностным лицам оперативно реагировать и иметь возможность влиять на систему управления ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании научно-методического аппарата оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Предложены формализованные модели и методика, позволяющие количественно оценивать ключевые параметры качества функционирования. Полученные результаты проведённого исследования вносят вклад в развитие положений теории поддержки принятия решений по управлению сетями связи ОАО «РЖД».

Практическая значимость результатов исследования заключается в предоставлении должностным лицам инструментов для обеспечения функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Это достигается за счёт создания выделенной сети на базе технологии MPLS L3VPN, которая обеспечивает изоляцию критических потоков. Кроме того, разработка программного модуля СМИППР позволяет оперативно осуществлять управление ТКС в неблагоприятных условиях с целью минимизации времени восстановления процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Предусмотрено его внедрение в состав действующей единой системы мониторинга и администрирования (ЕСМА) ОАО «РЖД». В свою очередь, использование результатов оценки качества функционирования ТКС ТКФС позволяет проводить оперативный анализ состояния ТКС ТКФС в условиях дестабилизирующих факторов и принимать превентивные меры по недопущению срыва перевозочного процесса.

Методология и методы исследования. Проведение исследования базировалось на использовании теории систем, общей теории связи, теории вероятности, методе топологического преобразования стохастических сетей. Практические методы основаны на использовании специализированного программного обеспечения.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

2. Методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

3. Научно-технические предложения по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Личный вклад. Все результаты, излагаемые в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Личный вклад автора состоит в проведении обзора и анализа проблем по выбранной теме, в сборе исходных данных о процессе функционирования ТКС ТКФС, разработке моделей и методик, а также в их программной реализации с помощью инструментов пакета программ Mathcad 14, языков программирования Visual Basic и Python, в подготовке публикаций и докладов на конференциях.

Реализация и внедрение работы. Результаты диссертационной работы использованы на предприятиях: «Гипротранссигналсвязь» – филиал АО «Росжелдорпроект», НИИ «Прогноз», а также при организации учебного процесса в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» на кафедре «Электрическая связь» для проведения занятий по дисциплинам «Передача дискретных сообщений на железнодорожном транспорте», «Цифровые технологии в системах обеспечения движения поездов».

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность полученных результатов исследования подтверждается: корректностью постановки решаемых задач, использованием апробированного математического аппарата, адекватной сложностью решаемых задач, обоснованностью вводимых допущений и ограничений, ясной физической трактовкой, непротиворечивостью полученных результатов результатам предшествующих исследований и практике эксплуатации существующих ТКС ТКФС. Кроме того, полученные научные результаты были апробированы на научно-технических конференциях и получили широкое одобрение.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертации докладывались на: научно-технической конференции «Санкт-Петербургского НТО РЭС имени А.С. Попова, посвященная Дню радио» – 2022, 2024 г., конференции «ELTRANS – 2023 Электрификация и электрическая тяга: цифровая трансформация железнодорожного транспорта», международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2024), конференции «Наука и образование транспорту» – 2025 г., конференции «Инновационная железная дорога. новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения с учётом опыта СВО», 2025 г. – Санкт-Петербург – Петергоф, научно-практических конференциях «Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения», 2025 г. – Санкт-Петербург и «Теория

и практика совершенствования отечественных систем связи, автоматизации и информационной безопасности», 2025 г. – Санкт-Петербург. Основные положения работы также доложены, обсуждены и одобрены на научно-технических семинарах кафедры «Электрическая связь» ФГБОУ ВО ПГУПС в 2022 – 2026 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи опубликованы в изданиях из списка рекомендованных ВАК, 1 статья в издании Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, списка сокращений, изложена на 197 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 2 таблицы.

Полученные результаты диссертационной работы соответствуют направлению исследований, предусмотренному пунктами 1, 4 и 18 паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия, сформулированы цель, задачи исследования, научная задача, определены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные научные результаты, выносимые на защиту, а также описаны методы выполнения исследования.

В первой главе диссертации проведён детальный анализ предметной области.

Установлено, что при внедрении высоких уровней автоматизации (GoA 3 – GoA 4 – Grade of Automation) ТКС перестала выполнять вспомогательную функцию и стала системообразующим элементом ТКФС, обеспечивающим сквозную связь между центрами управления, инфраструктурой и подвижным составом. Её архитектура представляет собой четырёхуровневую распределённую структуру (магистральный, региональный, объектовый и мобильный уровни), интегрирующую разнородные среды передачи данных и предъявляющую жёсткие требования к задержкам, достоверности и своевременности передачи управляющей информации.

Согласно концепции развития первичной сети связи ОАО «РЖД», ТКС подразделяются на сети, обеспечивающие гарантированную передачу критически важной информации, и сети для доставки служебной информации. Из-за недавнего внедрения ТКФС в инфраструктуру ОАО «РЖД» в действующих руководящих и нормативных документах отсутствует указание на то, к какому типу сетей должны быть отнесены ТКС

ТКФС. Это способствует передаче разнородных потоков информации без строгой сегментации и создаёт риски нарушения требуемых показателей качества функционирования.

Процесс управления подвижными объектами полностью зависит от непрерывности, целостности и своевременности передачи данных. Любое нарушение функционирования ТКС из-за сторонних процессов ведёт к нарушению контроля управления подвижными объектами. Такие нарушения могут привести к авариям или катастрофам.

В результате анализа были выявлены существенные противоречия: наличие нормативных требований к качеству процесса функционирования при отсутствии методик их количественной оценки в условиях дестабилизирующих факторов; интеграция ТКС ТКФС в состав сети связи без сегментации и приоритизации трафика, что вызывает конкуренцию за сетевые ресурсы и многократное увеличение задержек передачи данных; использование стандартных средств мониторинга – систем обнаружения вторжений (СОВ), систем управления информационной безопасностью (СУИБ) и ECMA, ориентированных на обеспечение целостности информации, при игнорировании качества функционирования ТКС.

Во второй главе разработана вербальная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Анализ показал, что для реализации дестабилизирующих факторов, выполняется сбор информации для выявления источников трафика, уязвимостей инфраструктуры, а также топологии сетевых элементов. Полученная информация позволяет сформировать план реализации дестабилизирующих процессов, направленный на максимальное нарушение качества функционирования ТКС ТКФС.

На основе проведённого анализа разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов (рисунок 2), объединяющая частные модели процессов: передачи данных по беспроводным каналам связи, функционирования узла коммутации (УК) в условиях дестабилизирующих факторов, функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД», реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами, восстановления информационного обмена, а также ряд частных моделей процессов передачи данных по проводным каналам связи и ожидания обслуживания пакетов данных различных категорий срочности.

Все модели объединены единым математическим аппаратом – методом топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС), доработанным с участием автора для определения эквивалентных функций (ЭФ) логических узлов «Включающее И», «Включающее ИЛИ». Это позволило аппроксимировать функции распределения (ФР) времени реализации процессов неполной гамма-функцией и использовать

циклическую процедуру двухмоментной аппроксимации. Преимущество данного подхода – возможность представления сложных процессов с высокой степенью детализации.

По результатам анализа, проведённого в первой главе, наиболее вероятным информационным дестабилизирующим процессом на ТКС ТКФС со стороны источника, по сравнению с другими ТКС, является «Отказ в обслуживании». Разработанная математическая модель показала, что время реализации этого процесса зависит от длительности этапов вскрытия сети и организации бот-сети.

Также разработана частная модель процесса передачи данных по беспроводным каналам связи, учитывающая одновременную реализацию процессов: установления соединения, поддержания установленного соединения и передачи команд управления в условиях реальной сигнально-помеховой обстановки и дестабилизирующих факторов. Ключевое отличие модели – снятие ограничений на вид распределений случайного времени реализации частных процессов и строгое получение эквивалентной функции фрагмента стохастической сети (рисунок 1), содержащего логический узел «Включающее И».

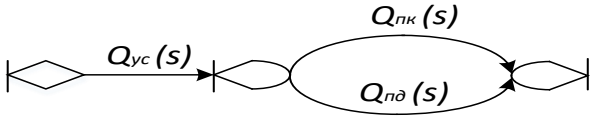


Рисунок 1 – Укрупнённая стохастическая сеть процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

В связи с этим, на основе метода ТПСС, была определена эквивалентная функция стохастической сети (1):

$$Q_{\text{рк}}(s)=Q_{\text{ус}}(s)L\{F_{\text{пк}}(t)F_{\text{пд}}(t)\}, \quad (1)$$

где: $L\{F_{\text{пк}}(t)F_{\text{пд}}(t)\}$ – оператор преобразования Лапласа произведения двух функций распределения, представленных в виде неполных гамма-функций.

Для определения преобразования Лапласа правого сомножителя в формуле (1) был предложен следующий подход.

Пусть задана функция распределения (2) с функцией плотности (3):

$$F(t)=\frac{\sigma^{\rho}\theta^{\zeta}}{\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)}\int_0^t t^{\rho-1}e^{-\sigma t}dt\int_0^t t^{\zeta-1}e^{-\theta t}dt, \quad (2)$$

$$f(t)=\frac{\sigma^{\rho}\theta^{\zeta}}{\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)}\big(g(t)G_1(t)+g_1(t)G(t)\big), \quad (3)$$

где g – производные: $g(t)=t^{\rho-1}e^{-\sigma t}$, $g_1(t)=t^{\zeta-1}e^{-\theta t}$, а G – их первообразные: $G(t)=\int_0^t t^{\rho-1}e^{-\sigma t}dt$, $G_1(t)=\int_0^t t^{\zeta-1}e^{-\theta t}dt$.

После определения изображения производных и их первообразных, было получено изображение функции плотности (4):

$$HA(s,N) = [HA_1(s,N) + HA_2(s,N)]\frac{(\sigma^{\rho}\theta^{\zeta})}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]}, \quad (4)$$

где: $HA_1(s,N) = \Gamma(\rho+\zeta)\sum_{k=0}^{N}\left[\frac{\sigma^k}{(s+\sigma+\theta)^{(\rho+\zeta+k)}}\frac{f(\rho+\zeta+k-1,k)}{f(\rho+k,k+1)}\right]$;

$HA_2(s,N) = \Gamma(\rho+\zeta)\sum_{k=0}^{N}\left[\frac{\theta^k}{(s+\sigma+\theta)^{(\rho+\zeta+k)}}\frac{f(\rho+\zeta+k-1,k)}{f(\zeta+k,k+1)}\right]$;

N – число членов ряда;

$f(t,k) = \begin{vmatrix}\prod_{j=0}^{k-1}(t-j), k>0\\ 1, k=0\end{vmatrix}$ – нисходящий факториал.

Выполнив почленный переход в пространство оригиналов, интегрируя полученный результат с переменным верхним пределом, была получена функция распределения времени одновременной реализации процессов передачи данных и поддержания установленного соединения (5):

$$HF(t,N) = [HF_1(t,N) + HF_2(t,N)]\frac{(\sigma^{\rho}\theta^{\zeta})}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]}, \quad (5)$$

где: $HF_1(t,N) = \Gamma(\rho+\zeta)\sum_{k=0}^{N}\left[\frac{\sigma^k\gamma[(\sigma+\theta)t,\rho+\zeta+k]}{(\sigma+\theta)^{(\rho+\zeta+k)}}\frac{f(\rho+\zeta+k-1,k)}{f(\rho+k,k+1)}\right]$;

$HF_2(t,N) = \Gamma(\rho+\zeta)\sum_{k=0}^{N}\left[\frac{\theta^k\gamma[(\sigma+\theta)t,\rho+\zeta+k]}{(\sigma+\theta)^{(\rho+\zeta+k)}}\frac{f(\rho+\zeta+k-1,k)}{f(\zeta+k,k+1)}\right]$;

$\gamma[(\sigma+\theta)t,\rho+\zeta+k]$ – гамма-распределение с параметрами $(\sigma+\theta)t$ и $(\rho+\zeta+k)$.

Подставив (5) в (2), была получена эквивалентная функция стохастической сети, представленной на рисунке 1 (6):

$$QA_{\text{рк}}(s,N) = \left(\frac{\nu}{\nu+s}\right)^{\varsigma}[HA_1(s,N) + HA_2(s,N)]\frac{(\sigma^{\rho}\theta^{\zeta})}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]} \quad (6)$$

Реализуя почленный переход в пространство оригиналов, интегрируя полученный результат с переменным верхним пределом, получим искомую функцию распределения времени процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС (7):

$$QF_{\text{рк}}(t,N) = \quad (7)$$

$$= \frac{(\sigma^{\rho}\theta^{\zeta})}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]}\left\{\begin{matrix}\Gamma(\rho+\zeta)\sum_{k=0}^{N}\left[\frac{\sigma^k\gamma(\lambda_k t,\alpha_k)}{(\sigma+\theta)^{(\rho+\zeta+k)}}\frac{f(\rho+\zeta+k-1,k)}{f(\rho+k,k+1)}\right]+\\ +\Gamma(\rho+\zeta)\sum_{k=0}^{N}\left[\frac{\theta^k\gamma(\lambda_k t,\alpha_k)}{(\sigma+\theta)^{(\rho+\zeta+k)}}\frac{f(\rho+\zeta+k-1,k)}{f(\zeta+k,k+1)}\right]\end{matrix}\right\}.$$

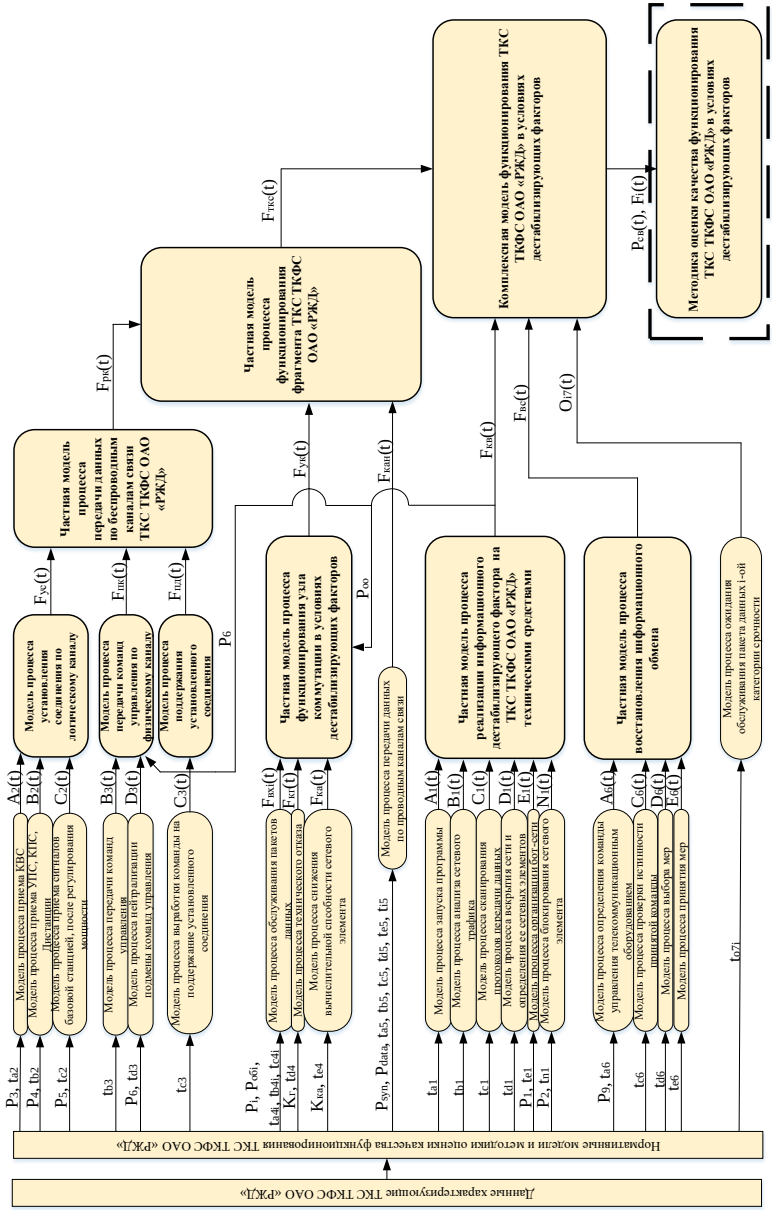


Рисунок 2 – Структурная схема комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

Результаты вычислений предложенного подхода к определению ЭФ фрагмента стохастической сети с логическим узлом «Включающее И» показали полное совпадение значений по формуле (5) с исходной функцией ФР (2) (рисунок 3). Учитывая сложность выражения ЭФ (6), оно было аппроксимировано неполной гамма-функцией, что позволило представить (7) в виде (8):

$$F_{\text{рку}}(t) = \frac{\alpha_{\text{рк}}{}^{\mu_{\text{рк}}}}{\Gamma(\mu_{\text{рк}})} \int_0^t t^{\mu_{\text{рк}}-1} e^{-\alpha_{\text{рк}} t} dt, \tag{8}$$

Анализ абсолютной погрешности аппроксимации (рисунок 4) показал, что её максимальное значение не превышает $9 \cdot 10^{-3}$, что вполне приемлемо для проведения инженерных расчётов.

На основе полученных результатов разработана частная модель функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов. Установлено, что время обслуживания пакета определяется исключительно его объёмом и пропускной способностью канала. Сравнение предельных ФР времени обслуживания при фиксированном и переменном объёме пакета (рисунок 5) показало: фиксированный объём данных обеспечивает меньшие задержки и отсутствие временных флуктуаций. Кроме того, с ростом интенсивности трафика возрастает влияние модели трафика на качество обслуживания (рисунок 6). При обслуживании пуассоновского потока наблюдается наименьшая задержка, тогда как самоподобные потоки (Вейбулла, Парето) вызывают значительный рост задержек, усиливающийся с увеличением индекса Хёрста H.

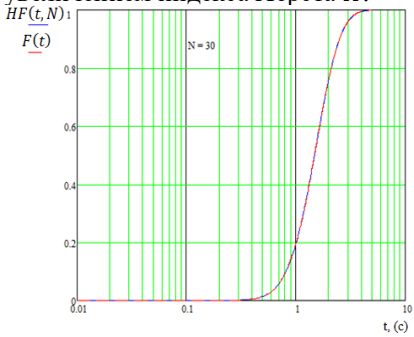


Рисунок 3 – Графики ФР времени реализации логического узла «Включающее И», полученные по формулам (2) и (5)

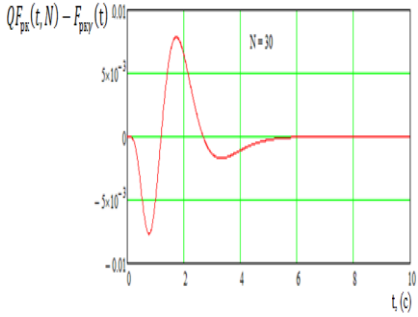


Рисунок 4 – Зависимость абсолютной погрешности аппроксимации ФР неполной гамма-функцией

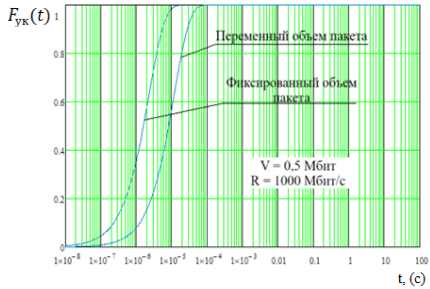


Рисунок 5 – Графики ФР времени обслуживания пакетов данных при различном объёме пакетов

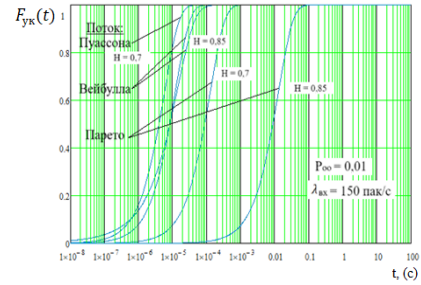


Рисунок 6 – Графики ФР времени задержки обслуживания пакетов данных при различных видах потока данных

Поскольку ТКС ТКФС использует инфраструктуру сетей ОАО «РЖД», на узлы коммутации поступает как критический трафик управления, так и сторонний трафик, что делает его разнородным. Моделирование фрагмента ТКС показало: передача разнородного трафика приводит к значительному росту времени доставки команд управления. Следовательно, для обеспечения требуемых задержек необходимо передавать только однородный трафик. Реализация дестабилизирующих факторов на сетевые элементы резко снижает коэффициент готовности УК, что многократно увеличивает время передачи данных. Это подчёркивает необходимость внедрения мер по мониторингу технического состояния оборудования.

На основе частных моделей разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, отличающаяся от известных тем, что учитывает совместное влияние гибридных дестабилизирующих факторов, категории срочности передаваемого трафика и ожидание обслуживания данных.

На всех этапах моделирования использован единый подход – циклическая аппроксимация неполной гамма-функцией, что позволило получить итоговую ФР (9), дифференцированную по категориям срочности:

$$F_i(t) = \begin{cases} \left[\gamma_{11}(Z_1 t, X_1) - \gamma_{21}(H_1 t, J_1)\left\{\frac{\alpha_{кв}{}^{\mu_{кв}}}{(\alpha_{кв}+\alpha_{ткс1})^{\mu_{кв}}}\right\} + \gamma_{31}(Y_1 t, U_1)\left\{\frac{\alpha_{кв}{}^{\mu_{кв}}}{(\alpha_{кв}+\alpha_{ткс1})^{\mu_{кв}}}\right\}\right] \\ \left[\gamma_{1i}(Z_i t, X_i) - \gamma_{2i}(H_i t, J_i)\left\{\frac{\alpha_{кв}{}^{\mu_{кв}}}{(\alpha_{кв}+\alpha_{ткс1})^{\mu_{кв}}}\right\} + \gamma_{3i}(Y_i t, U_i)\left\{\frac{\alpha_{кв}{}^{\mu_{кв}}}{(\alpha_{кв}+\alpha_{ткс1})^{\mu_{кв}}}\right\}\right] \end{cases} \quad (9)$$

Анализ показал, что при наличии дестабилизирующих факторов время успешной доставки данных возрастает почти вдвое (рисунок 7). Это обосновывает необходимость затруднения доступа к ТКС для источника дестабилизирующих факторов. С другой стороны, сокращение времени восстановления резко снижает задержки (рисунок 8), что подтверждает целесообразность разработки методов прогнозирования, мониторинга и оперативного восстановления ТКС.

Таким образом, результаты моделирования выявили, что задержки при передаче разнородного трафика соизмеримы с задержками, вызванными дестабилизирующими факторами. При этом под их влиянием интенсивность обслуживаемого потока данных существенно снижается, а поток становится пуассоновским.

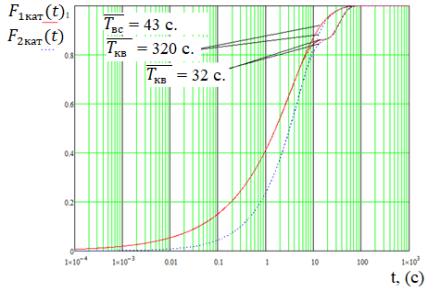


Рисунок 7 – Графики ФР времени передачи данных 2-х категорий срочности в условиях дестабилизирующих факторов

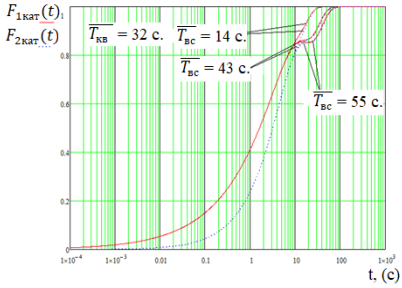


Рисунок 8 – Графики ФР времени передачи данных 2-х категорий срочности в условиях дестабилизирующих факторов при различных значениях времени восстановления

В третьей главе разработана методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Существующие методы управления, ориентированные на обеспечение целостности данных, оказываются недостаточными для противодействия процессам, направленным на задержку или блокировку доставки управляющей информации.

Исходные данные, используемые в методике, соответствуют требованиям нормативных и руководящих документов, а также результатам моделирования ТКС. В качестве основного показателя выбрана вероятность своевременной передачи данных: $P_{св}\{t_{пер} \leq T_{зад}\}$, где для 1-ой категории срочности $\{t_{пер} \leq T_{зад} = 1(c)\}$, для 2-ой категории срочности и ниже $\{t_{пер} \leq T_{зад} = 5(c)\}$.

Последовательность вычисления показателя представлена на рисунке 10, а основные расчётные соотношения основаны на разработанной комплексной модели. Согласно результатам расчётов (рисунок 9), значение вероятности своевременной доставки данных не соответствует требованиям руководящих документов для всех категорий срочности.

Существующие подходы к обеспечению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» не обеспечивают требуемого уровня своевременности доставки данных в условиях дестабилизирующих факторов. Учитывая критическую роль ТКС в управлении подвижными объектами, в методику оценки была интегрирована методика выбора

рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

В работе проведён анализ для двух категорий срочности, а именно: $P_{\text{св}} = 0{,}999$ при $T_{\text{зад}} \leq 1, (\text{с})$; для данных 2-й категории срочности и ниже: $P_{\text{св}} = 0{,}99$ при $T_{\text{зад}} \leq 5, (\text{с})$. Методика позволяет определить степень зависимости показателя качества от значений и диапазонов изменения исходных параметров, используемых в моделировании. В качестве меры влияния выбрано приращение вероятности своевременной доставки данных $\Delta P_{\text{св}}(T_{\text{зад}})$. Критерием выбора является максимизация этого приращения по совокупности параметров.

Для снижения вычислительной сложности при решении данной задачи использован градиентный метод Гаусса–Зейделя, учитывающий свойство вложенности моделей, что позволяет уточнять решение без полного пересчёта на каждой итерации. С использованием преобразования Лапласа вместо временных функций распределения применяются их производящие функции, что сохраняет порядок влияния параметров на результат.

По результатам расчётов формируется ранжированное множество параметров, определяющих качество функционирования ТКС. Анализ зависимости приращений от частных параметров показал, что наиболее целесообразными направлениями повышения вероятности своевременной доставки данных являются: снижение доступности к сетевым элементам, сокращение времени восстановления информационного обмена за счёт оперативного обнаружения изменений трафика, а также организация выделенной ТКС ТКФС.

Таким образом, параллельное выполнение расчётов по методу Гаусса-Зейделя и оценке качества функционирования уже на этапе ввода исходных данных позволяет получить не только оценочные данные характеристики объекта, но и определить диапазон изменения исходных данных. Это обеспечивает формирование двух параллельных вычислительных процессов, результатом которых, к моменту получения оценки, становится ранжированное множество параметров, наиболее существенно влияющих на качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Эти параметры напрямую определяют содержание научно-технических предложений.

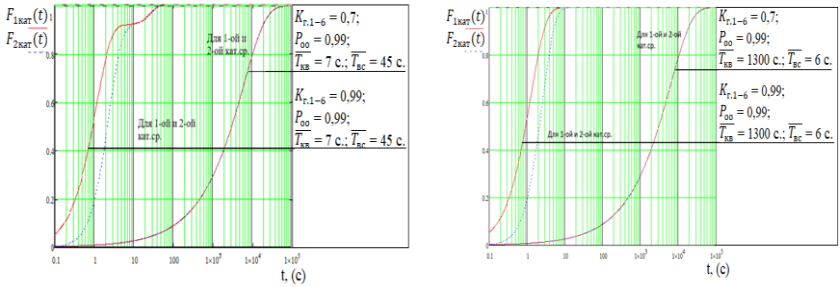


Рисунок 9 – Графики ФР времени доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности

В четвёртой главе разработаны научно-технические предложения (НТП), направленные на повышение качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Во-первых, предложена совокупность мероприятий по организации структуры выделенной ТКС на базе технологии MPLS L3VPN (рисунок 11). Это решает проблему конкуренции критического трафика управления со сторонними потоками. Архитектура MPLS L3VPN обеспечивает полную изоляцию данных высоких категорий срочности в отдельный VRF (Virtual Routing and Forwarding); гарантированное качество обслуживания за счёт предопределенных маршрутов передачи LSP (Label-Switched Paths) с использованием протокола RSVP-TE (Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering); строгую приоритизацию трафика; сокращает время доставки данных в несколько раз. Это позволит напрямую противодействовать дестабилизирующим процессам за счёт затруднения проведения сбора данных через скрытую топологию VRF и динамической маршрутизации.

Во-вторых, разработана структура программного модуля СМИППР, внедрённая в ЕСМА (Свидетельство о государственной реализации программы для ЭВМ №2025680872) (рисунок 12). Модуль обеспечивает оперативное обнаружение и нейтрализацию дестабилизирующих факторов за счёт трёхкомпонентной архитектуры: цифровой двойник (ЦД) – прогнозирует состояние сети; интеллектуальные агенты (ИА) – размещены на сетевых элементах, осуществляют децентрализованное принятие решений и автономное реагирование; датчики Интернета вещей – собирают параметры физического состояния оборудования, позволяя обнаруживать признаки физических дестабилизирующих факторов.

Таким образом, реализация НТП позволила устранить архитектурные уязвимости ТКС ТКФС, а также обеспечить проведение мониторинга ТКС в режиме реального времени. В результате была сформирована целостная система управления ТКС ТКФС.

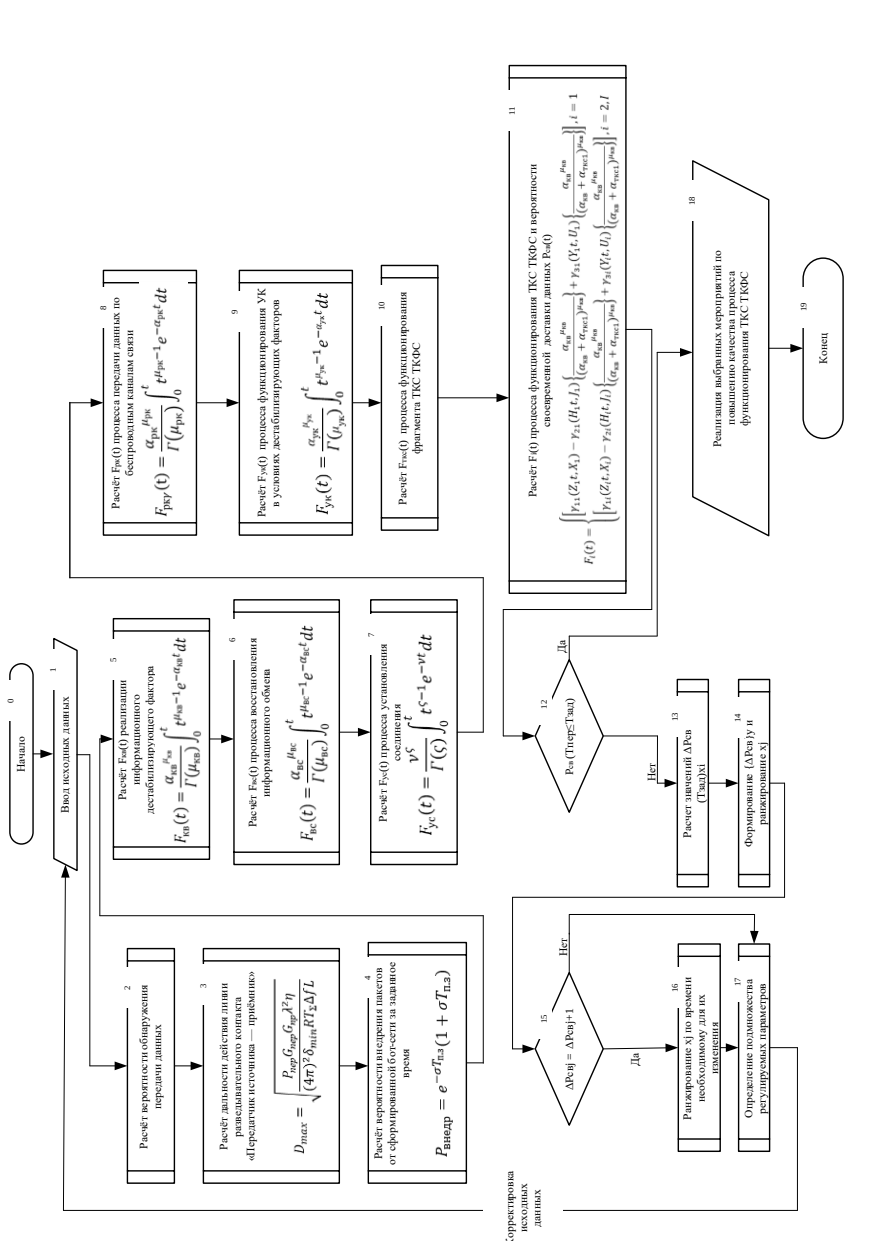


Рисунок 10 – Блок-схема этапов расчёта методики оценки качества процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

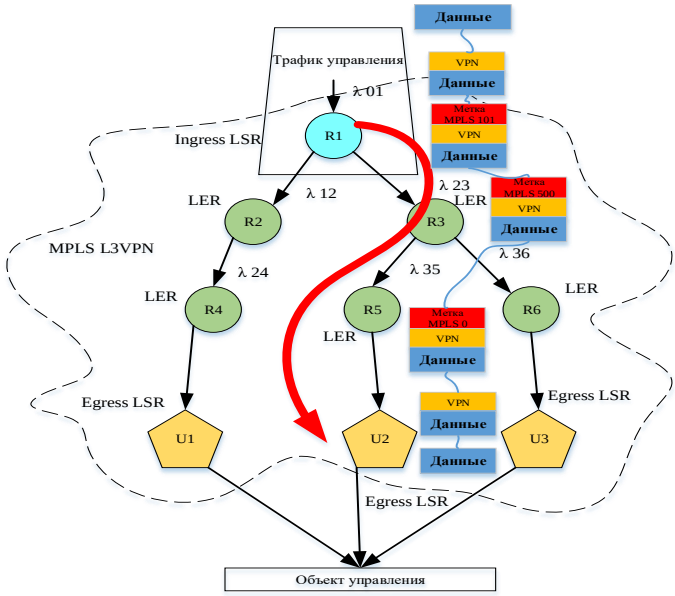


Рисунок 11 – Вариант организации структуры выделенной сети с использованием технологии MPLS L3VPN для фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

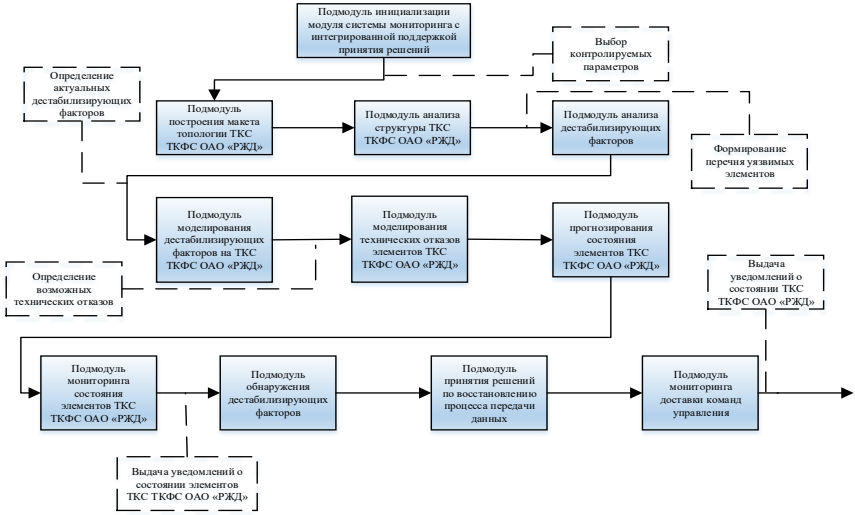


Рисунок 12 – Общая структура программного модуля СМИППР

На рисунке 13 представлены графики ФР времени доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности при реализации НТП. Анализ показал, что время доставки данных сократилось более чем в 10 раз, что свидетельствует о высокой эффективности внедрения НТП. Рисунки 14, 15 демонстрируют снижение времени доставки данных при реализации НТП.

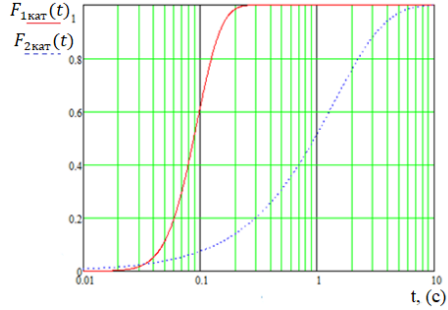


Рисунок 13 – Графики ФР времени доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности при реализации НТП

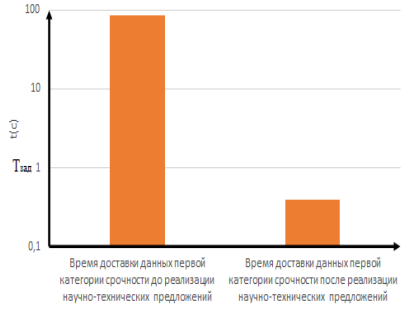


Рисунок 14 – Значения времени доставки данных первой категории срочности при реализации НТП

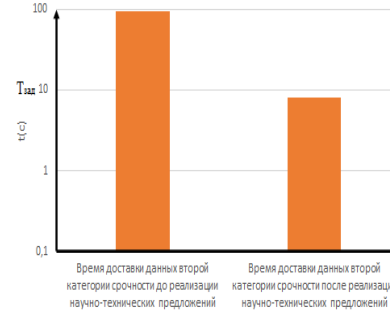


Рисунок 15 – Значения времени доставки данных второй категории срочности при реализации НТП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в диссертационной работе решена актуальная научная задача, имеющая существенное значение для Министерства транспорта Российской Федерации, что в полной мере соответствует цели исследования.

Разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, позволяющая проводить комплексную оценку действий на сетевые элементы и сеть в целом. Комплексная модель, в отличие от известных, учитывает процессы передачи данных различных категорий срочности по разнородным каналам связи, функционирование узлов коммутации в условиях дестабилизирующих

факторов и процесс восстановления информационного обмена. Модель впервые количественно подтвердила синергетическое влияние информационных и физических дестабилизирующих факторов: время восстановления при совместном влиянии кратно увеличивается.

Разработана методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, учитывающая условия дестабилизации процесса функционирования ТКС. Методика позволяет определять показатель оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», производить расчёт и оценку вероятности своевременной доставки данных. Кроме того, методика позволяет проводить обоснованный выбор мероприятий по повышению качества функционирования ТКС и количественно оценивать качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Применение разработанной методики выявило несоответствие существующей архитектуры ТКС ТКФС действующим нормативным требованиям.

Разработаны НТП по организации структуры выделенной ТКС ТКФС на базе MPLS L3VPN. Это обеспечило сегментацию и изоляцию критического трафика. Также разработана структура программного модуля СМИППР для проведения оперативного мониторинга, прогнозирования состояния сети и автоматического восстановления информационного обмена. Разработанные решения интегрируются в существующую инфраструктуру ОАО «РЖД» и направлены на реализацию активного управления ТКС ТКФС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях

1. Привалов, А. А. Математическая модель процесса передачи команд управления по радиоканалам автоматизированных систем / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов**, Ал. А. Привалов // Информация и космос. – 2023. – № 4. – С. 71-83.

2. Математическая модель функционирования сети передачи данных киберфизической системы в условиях кибервоздействия злоумышленника / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов**, Е. В. Скуднева, Ал. А. Привалов // Информация и космос. – 2024. – № 3. – С. 74-84.

3. Методика комплексной оценки качества функционирования сети передачи данных киберфизических систем ОАО «РЖД» / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов** // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 316-328. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-2-316-328.

В издании, индексируемом в Scopus

4. Mathematical Model of the Process of Data Transmission over the Radio Channel of Cyber-Physical Systems / F. Makhmudov, A. Privalov, Al. Privalov, **A. Boldinov** [et al.] // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 10. – P. 1452. – DOI 10.3390/math12101452.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613200 Российская Федерация. Программа для определения эквивалентной функции в виде стохастической сети, включающей в себя логический узел «И»: заявл. 29.01.2024: опубл. 08.02.2024 / **А. М. Болдинов**, А. А. Привалов, А. А. Привалов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680872 Российская Федерация. Программа мониторинга кибербезопасности телекоммуникационной сети в условиях кибервоздействий и технических отказов: заявл. 30.07.2025: опубл. 08.08.2025 / **А. М. Болдинов**, А. А. Привалов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

В других изданиях

7. Болдинов, А. М. Угрозы телекоммуникационным сетям в киберфизических системах / **А. М. Болдинов**, А. А. Привалов // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК, Санкт-Петербург. – 25 – 29 апреля 2022. – № 1(77). – С. 182-184.

8. Болдинов, А. М. Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R / **А. М. Болдинов**, А. А. Привалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 743-751. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-743-751.

9. Болдинов, А. М. Оценка качества функционирования радиоканала подвижной связи киберфизической системы / **А. М. Болдинов**, А. А. Привалов // Eltrans – 2023 : сборник трудов XI Международного симпозиума, Санкт-Петербург, 31 мая – 02 июня 2023 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург: ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. – С. 75-80.

10. Болдинов, А. М. Комплексная модель сети передачи данных киберфизической системы / **А. М. Болдинов** // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. – Санкт-

Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2024. – С. 117-121.

11. Привалов, А. А. Организация выделенной телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы с использованием технологии MPLS L3VPN / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов** // Наука и образование транспорту, Самара. – 06 – 07 ноября 2025. – № 1. – С. 291-296.

12. Привалов, А. А. Система мониторинга и принятия решений системы управления кибербезопасностью телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов** // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения с учётом опыта СВО: Материалы VIII-й отраслевой научно-практической конференции, Петергоф, 14 мая 2025 года. – Санкт-Петербург - Петергоф: Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева, 2025. – С. 317-325.

13. Привалов, А. А. К вопросу о расчете времени доставки данных в киберфизических системах ОАО «РЖД» / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов** // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения: Материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2025. – С. 274-279.

14. Привалов, А. А. Математическая модель процесса реализации атаки злоумышленником типа «отказ в обслуживании» / А. А. Привалов, **А. М. Болдинов** // Теория и практика совершенствования отечественных систем связи, автоматизации и информационной безопасности: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 17–18 октября 2025 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2025. – С. 53-61.