

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Привалов Андрей Андреевич
доктор военных наук, профессор

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД»	13
1.1 Роль и место телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»	13
1.2 Особенности функционирования телекоммуникационной сети транспортных киберфизических систем ОАО «РЖД»	18
1.3 Анализ дестабилизирующих факторов в отношении телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»	23
1.4 Постановка задачи на исследование. Структура исследования и формулировка научной задачи.	28
Выводы по главе 1	34
ГЛАВА 2 КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ.....	37
2.1 Вербальная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.....	37
2.2 Частная модель процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами.....	45
2.3 Частная модель процесса восстановления информационного обмена	51
2.4 Частная модель процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»	56

2.5 Частная модель процесса функционирования узла коммутации в условиях дестабилизирующих факторов.....	73
2.6 Частная модель процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»	81
2.7 Комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.....	92
2.8 Выводы по главе 2	104
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ.....	109
3.1 Выбор и обоснование показателей и критериев оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов	109
3.2 Структура и содержание методики оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»	112
3.3 Методика выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов	126
3.4 Оценка и анализ качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.....	135
3.5 Выводы по главе 3	137
ГЛАВА 4 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ	

ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ	140
4.1 Основные пути повышения качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»	140
4.2 Вариант организации структуры выделенной телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»	141
4.3 Структура программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений по управлению телекоммуникационной сетью транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»	148
4.4 Оценка качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» при совместной реализации разработанных научно-технических предложений	169
4.5 Выводы по главе 4	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	172
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ А	191

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Современный этап развития железнодорожного транспорта Российской Федерации сопровождается ускоренной цифровизацией инфраструктуры и внедрением высоких уровней автоматизации перевозочного процесса. Ключевым элементом этой трансформации выступают транспортные киберфизические системы (ТКФС), интегрирующие физические компоненты и вычислительные подсистемы.

К физическим компонентам относятся подвижной состав, железнодорожная инфраструктура и устройства автоматизации. Вычислительные подсистемы реализуются через центры управления перевозками, системы мониторинга и аппаратно-программные платформы обработки данных. Центральным элементом в обеспечении функционирования ТКФС является телекоммуникационная сеть (ТКС). ТКС выполняет функцию «цифровой нервной системы» и обеспечивает передачу управляющих, диагностических и служебных данных в реальном времени в соответствии с Правилами технической эксплуатации (ПТЭ) железных дорог Российской Федерации [1-3].

ТКС представляет собой сложный многоуровневый комплекс, который включает в себя станционное оборудование, а также линии передачи данных. Именно через ТКС передаются разнородные информационные потоки. Нарушение функционирования ТКС приводит к задержкам или потерям передаваемых данных, что в условиях высокой автоматизации может вызвать дестабилизацию перевозочного процесса, а в крайних случаях – аварии и катастрофы.

В соответствии с Федеральным законом № 187 – ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» ТКФС, как часть интеллектуальной транспортной системы железнодорожного транспорта, а также её телекоммуникационная сеть официально отнесены к объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ). В этих условиях реализация дестабилизирующих факторов – то есть воздействий на сеть связи, обусловленных внутренними или внешними физическими, техническими

источниками – может привести к срыву или полному прекращению перевозочного процесса. Под дестабилизирующими факторами понимаются любые события или действия, вызывающие снижение качества функционирования сети, включая, но не ограничиваясь информационными и физическими причинами: отказами оборудования, сбоями программного обеспечения, кибервоздействиями, несанкционированным физическим доступом к сетевым элементам.

В текущих условиях наблюдается устойчивый рост числа внешних дестабилизирующих факторов на инфраструктуру ОАО «РЖД». Их цель – не компрометация данных, а нарушение самого процесса их передачи, что в условиях высокой автоматизации перевозочного процесса приводит к деградации ключевых свойств ТКС: доступности, целостности и, прежде всего, своевременности доставки команд управления.

Несмотря на наличие в инфраструктуре ОАО «РЖД» традиционных средств мониторинга – систем обнаружения вторжений (СОВ) [4], систем управления информационной безопасностью (СУИБ) [5] и Единой системы мониторинга и администрирования (ЕСМА) [6], существующие решения не учитывают специфику функционирования ТКС ТКФС. Они ориентированы на обеспечение целостности информации, но не позволяют предотвратить нарушение передачи данных, особенно для потоков высокой категории срочности, где критически важны своевременность и доступность.

Таким образом, 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 проблемы.

Описание транспортных киберфизических систем 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., Ададунова 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.

Следовательно, необходимость разрешения выявленных противоречий определяет актуальность темы и научной задачи диссертационной работы.

Цель, научная задача и задачи исследования.

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

В соответствии с указанной целью исследования актуализируется следующая **научная задача исследования**: 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.

Поставлены и решены **задачи исследования:**

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 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 СМППР 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 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 сопровождалось использованием теории в области существующих ТКФС, положений нормативных документов по обеспечению необходимого уровня качества функционирования ТКС.

Теоретические методы исследования основаны на 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.

Реализация и внедрение работы.

Результаты диссертационной работы использованы на предприятиях: «Гипротрансигнальсвязь» – 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 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.

Данные о публикациях.

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД»

1.1 Роль и место телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»

Развитие цифровых технологий [7, 8] во всём мире способствовало их активному внедрению в транспортную отрасль. Одним из ключевых результатов этого процесса стало появление интеллектуальных транспортных систем железнодорожного транспорта (ИТС ЖДТ) [9].

Под ИТС ЖДТ понимают интеграцию информационных, коммуникационных, телематических и управляющих технологий, направленную на эффективное и надёжное управление транспортным комплексом [9].

Особой разновидностью ИТС ЖДТ являются транспортные киберфизические системы — комплекс, объединяющий взаимодействующие сети физических и вычислительных компонентов для управления подвижными объектами [10]. При этом подвижные объекты способны обмениваться данными между собой, обеспечивая координацию и повышение уровня автоматизации перевозочного процесса [10].

Отличительными особенностями ТКФС по сравнению с классическими ИТС являются:

- цифровая интеграция компонентов;
- распределённая цифровая коммуникация в реальном времени;
- параллелизм вычислительных и физических процессов;
- наличие как восходящих (от физических объектов к вычислительным модулям), так и нисходящих (от управляющих систем к исполнительным устройствам) потоков данных;
- интеграция синхронных и асинхронных механизмов управления [11].

Согласно рекомендациям Международного союза общественного транспорта (UITP) и стандартам, применяемым в рамках концепции UGTMS (Urban Guided Transport Management Systems), автоматизация движения поездов подразделяется на пять уровней (GoA — Grade of Automation) — от GoA 0 до GoA 4 [12-15]:

- GoA 0 – ручное управление: все функции выполняются машинистом, автоматизация отсутствует;
- GoA 1 – ручное управление с автоматической поддержкой: запуск, торможение и остановка поезда выполняются машинистом, при этом система автоматически обеспечивает регулирование скорости и предотвращает превышение допустимых эксплуатационных параметров;
- GoA 2 – полуавтоматическое управление: функции запуска, ведения и остановки поезда реализуются автоматикой, но машинист остаётся, он отвечает за наблюдение за состоянием пути, управление дверьми и реагирует на нештатные ситуации;
- GoA 3 – управление без машиниста: движение полностью автоматизировано, но операторы системы обладают возможностями для предотвращения аварийных ситуаций;
- GoA 4 – полностью автономная эксплуатация: поезд функционирует без какого-либо персонала на борту [12-15].

Достижение высоких уровней автоматизации, соответствующих GoA 3 и GoA 4, возможно только при наличии устойчивой, отказоустойчивой и защищённой телекоммуникационной инфраструктуры [12-15]. Именно эти уровни реализуются в ТКФС ОАО «РЖД» и представляют наибольшую сложность с точки зрения обеспечения надёжности взаимодействия компонентов ТКФС.

Архитектура функционирования ТКФС разбивается на несколько уровней (рисунок 1.1) [16, 17]:

- физический уровень: осуществляет доступ к сетевому уровню. Он состоит из сенсоров, датчиков и других устройств, которые взаимодействуют друг с другом по проводным или беспроводным каналам связи;
- сетевой уровень: маршрутизация и передача пакетов данных;

- транспортный уровень: обеспечение надёжной доставки данных;
- промежуточный уровень: преобразование протоколов доставки данных для их обработки модулями адресации и профилирования, поиска и выбора устройств управления;
- уровень приложений: хранение и анализ данных. Принятие решений по управлению подвижными объектами [16, 17].

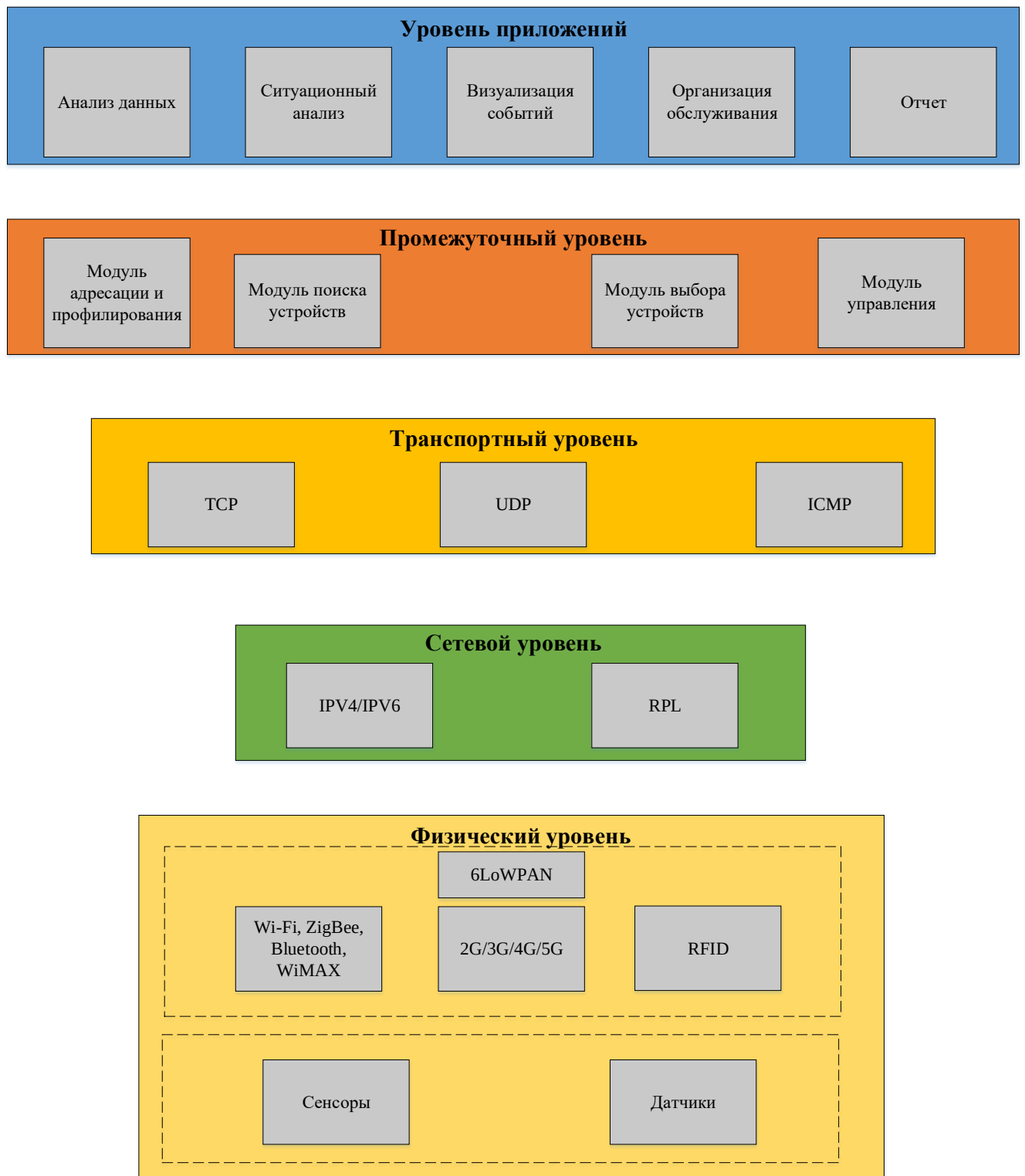


Рисунок 1.1 – Общая архитектура функционирования транспортной киберфизической системы

Задачами ТКФС ОАО «РЖД» в соответствии с программой инновационного развития ОАО «РЖД» является:

– управление станционной и поездной работой;

- обеспечение безопасности маневровых операций;
- оптимизация организации движения и станционных процессов;
- мониторинг состояния пути и инфраструктуры;
- диагностика подвижного состава в реальном времени;
- снижение эксплуатационных и экономических затрат;
- обеспечение перевозочного процесса [18].

Реализация указанных задач невозможна без создания единого информационного пространства, ядром которой выступает высокоскоростная и масштабируемая телекоммуникационная сеть [18]. Именно ТКС связывает физический уровень с уровнем приложений ТКФС и является основой функционирования всей ТКФС ОАО «РЖД».

В соответствии с Федеральным законом №187 Российской Федерации, ТКФС ОАО «РЖД» как объект ИТС ЖДТ, а также её информационно-телекоммуникационные сети, отнесены к объектам критической информационной инфраструктуры [19]. Это означает, что любые внешние и внутренние дестабилизирующие факторы на элементы ТКС могут привести к нарушению или к полному прекращению перевозочного процесса, с потенциальными катастрофами или авариями [19].

Таким образом, ТКС ТКФС ОАО «РЖД» выступает не вспомогательным элементом ТКФС, а играет центральную, системообразующую роль. Обеспечивает целостность, управляемость и устойчивость ТКФС. В этих условиях становится необходимым разработать комплексную модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», а также методику оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Такой подход позволит выявить уязвимости ТКС, определить основные направления по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях внешних и внутренних факторов.

Поскольку одной из ключевых задач внедрения ТКФС является обеспечение непрерывного и устойчивого перевозочного процесса, а управление объектами ТКФС осуществляется на высоких уровнях автоматизации (GoA 3 – GoA 4), к

процессу функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» предъявляются повышенные требования. В связи с этим возникает необходимость выявления особенностей функционирования ТКС ТКФС.

1.2 Особенности функционирования телекоммуникационной сети транспортных киберфизических систем ОАО «РЖД»

Ввиду того, что главной задачей ТКФС ОАО «РЖД» является обеспечение непрерывного процесса управления подвижным составом, особенности функционирования ТКС обусловлены её системообразующей ролью в реализации этого процесса. ТКС ТКФС ОАО «РЖД» представляет собой сложную, распределённую и многокомпонентную инфраструктуру, обеспечивающую связь между центрами управления, физической инфраструктурой и подвижными объектами.

Под ТКС ТКФС понимается совокупность технических и программных средств, предназначенных для обработки, хранения и передачи данных на большие расстояния [20]. В отличие от традиционных ТКС ОАО «РЖД», ориентированных преимущественно на передачу служебной и административной информации, ТКС ТКФС характеризуется: интеграцией с физическими объектами управления, жёсткими требованиями по времени доставки данных, передачей разнородной информации. В свою очередь архитектура ТКС разбивается на следующие уровни [21]:

- магистральный уровень: обеспечивает передачу больших объёмов данных между центрами управления и обработки данных;
- региональный уровень: выполняет маршрутизацию трафика между линейными объектами (станциями, разъездами) и магистральной сетью. На этом уровне осуществляется первичная обработка и фильтрация данных, а также распределение команд управления;

- объектовый уровень: связывает между собой отдельные технические объекты, такие как станции, перегоны;
- мобильный уровень: обеспечивает связь с подвижными объектами через сети беспроводной связи (GSM-R, LTE-R) [21].

В соответствии с ведомственными нормативными документами [22] ТКС ОАО «РЖД» делятся на два вида из-за различного назначения: сети связи оперативно-технологического назначения (ОТН) и общетехнологического назначения (ОБТН) [21]. Основное отличие сетей ОТН заключается в том, что они обеспечивают гарантированную передачу информации, критически важной для управления железнодорожными перевозками. Сети ОБТН, напротив, предназначены для передачи вспомогательной информации [21, 23].

Ввиду относительно недавнего внедрения ТКФС в инфраструктуру ОАО «РЖД», в действующих руководящих и нормативных документах отсутствует чёткое указание на то, к какому типу сетей должна быть отнесена ТКС ТКФС [22]. В результате может возникнуть ситуация, при которой разнородные информационные потоки будут передаваться без строгой сегментации. Такие условия функционирования ТКС ТКФС создают риски для обеспечения требуемых показателей качества функционирования.

В Рекомендации МСЭ-T E.800 [24], качество определяется как «совокупность характеристик объекта, обуславливающих его способность удовлетворять установленные и предполагаемые потребности». Применительно к ТКС ТКФС главной функциональной потребностью является обеспечение своевременной доставки данных объектам управления, особенно данных, относящихся к командам управления.

Функционирование ТКС ТКФС ОАО «РЖД» характеризуется рядом принципиальных особенностей, обусловленных масштабом инфраструктуры и уровнем автоматизации перевозочного процесса.

1. Гетерогенность среды передачи данных. ТКС ТКФС интегрирует разнородные технологии связи. Любое несогласование между компонентами ТКС

может привести к потере или искажению управляющих команд, что особенно критично при автоматизированном ведении подвижного состава (GoA 3 – GoA 4):

- проводные каналы связи: преимущественно оптоволоконные линии связи (ОКС), обеспечивающие высокую пропускную способность и помехоустойчивость;

- беспроводные каналы связи: специализированные радиосистемы GSM-R, DMR, LTE-R для обеспечения связи с подвижным составом;

- разнородные протоколы связи.

2. Критичность к задержкам передачи данных:

- передача данных внутри ТКС ТКФС должна быть синхронной, детерминированной и устойчивой к задержкам. Это особенно актуально для ТКФС, где даже при кратковременной потере связи или при превышении задержки передачи данных может возникнуть аварийная ситуация [25].

3. Обеспечение непрерывности управления:

- перевозочный процесс невозможен без постоянного, сквозного обмена данными между распределёнными узлами коммутации. В связи с этим проектирование ТКС ТКФС должно обеспечиваться с учётом принципов: резервирования каналов связи, разделения трафика по категориям срочности, динамической маршрутизации и выделения ресурса сети связи для передачи команд управления.

4. Обеспечение достоверности передаваемых данных:

- значительная часть оборудования не поддерживает достоверность передачи данных, это создает уязвимости для искажения команд управления, изменения данных о состоянии сети, реализации дестабилизирующих факторов «Отказ в обслуживании» [26] на ТКС.

5. Трудность обновления оборудования и программного обеспечения (ПО):

- телекоммуникационное оборудование железнодорожной инфраструктуры имеет длительный жизненный цикл, что изначально ограничивает частоту его замены. В текущих условиях эти ограничения усугубляются ограниченным доступом к современным аппаратным платформам и ПО вследствие внешних

санкционных режимов. В результате возникает технологическое отставание, затрудняющее соответствие действующим международным и национальным стандартам информационной безопасности [27, 28], а также может снижать качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

6. Многоуровневая классификация информационных потоков. ТКС ТКФС обеспечивает передачу разнородных информационных потоков, которые можно разделить на несколько категорий срочности [29]:

I. Команды управления:

- команды диспетчерского управления движением;
- управление стрелками, светофорами, переездами;
- данные о параметрах движения подвижного состава: скорость, ускорение, торможение;
- данные о нахождении подвижного состава [29].

II. Диагностические и мониторинговые данные:

- состояние инфраструктуры;
- техническое состояние локомотивов и вагонов;
- сигналы тревоги от систем охраны, пожаротушения, видеонаблюдения [29].

III. Вспомогательные данные:

- синхронизация времени;
- обновление ПО контроллеров и серверов [29].

Исходя из принципиальных особенностей процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», к ТКС ТКФС предъявляется ряд требований [30].

1. Своевременность передачи данных [30].

ТКС ТКФС обеспечивает своевременное время доставки данных. Время своевременной доставки данных не должно превышать установленного предельного значения, которое регламентируется требованиями руководящих документов [31].

2. Достоверность передаваемых данных [30].

Качество обслуживания ТКС ТКФС определяется в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т E.800 как «совокупный эффект рабочих характеристик службы, определяющий степень удовлетворенности пользователя» [24].

3. Надёжность сети и сетевых элементов [30].

Показатель надёжности сетевой инфраструктуры и отдельных её компонентов определяется через коэффициент готовности, который рассчитывается как отношение времени исправной работы к общему времени работы [32, 33].

4. Система мониторинга и администрирования [30].

Для обеспечения функционирования ТКС ТКФС необходимо наличие средств системы мониторинга и администрирования для работы оператора сети. Должен быть обеспечен: непрерывный контроль состояния сети и сетевых элементов, диагностика каналов передачи данных, регистрация сбоев и отказов оборудования. С этой целью используется ЕСМА [34, 35].

Телекоммуникационная сеть ТКФС является сложной системой со своими особенностями функционирования и требованиями [36]. Процесс управления подвижными объектами полностью зависит от непрерывности, целостности и своевременности передачи данных. Любое нарушение процесса функционирования ТКС из-за внешних или внутренних факторов на оборудование ведёт к нарушению контроля управления подвижными объектами. Эта опасность может привести к авариям или катастрофам.

В этой связи недопустимы любые целенаправленные или случайные дестабилизирующие процессы на физическую и информационную инфраструктуру ТКС. С целью оперативного мониторинга инфраструктуры ТКС и оперативности принятия решений из-за различных условий, необходимо разработать программный модуль СМППР ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Учитывая, что ТКС ТКФС обеспечивает связь между физическими объектами и центрами управления, даже кратковременное нарушение её функционирования может привести к нарушению процесса управления перевозками. Поэтому необходимо провести анализ возможных

дестабилизирующих факторов в отношении процесса функционирования ТКС ТКФС, учитывающий выявленные особенности функционирования сети [37].

1.3 Анализ дестабилизирующих факторов в отношении телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»

Согласно открытой статистике, только за 2024 год инфраструктура ОАО «РЖД» подвергалась более чем 4 миллионам внешним и внутренним дестабилизирующим факторам. При этом наблюдается не только рост их количества, но и увеличение спектра причин.

Анализ происшествий на железных дорогах с 2019 года показывает устойчивый рост числа серьезных инцидентов (рисунок 1.2).

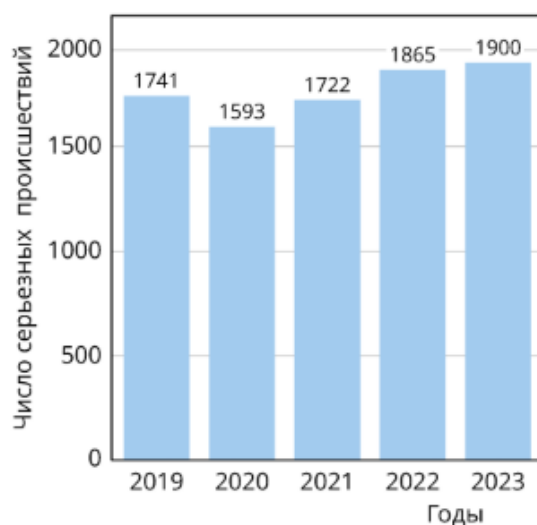


Рисунок 1.2 – Динамика числа происшествий на железных дорогах

При этом основными причинами выступают внешние факторы, которые по своей значимости превосходят внутренние (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Влияние внешних и внутренних факторов на число происшествий

К внешним факторам относят: проникновение на объекты ЖДТ, неблагоприятные погодные условия, целенаправленные действия на информационную инфраструктуру. Внутренними являются технические отказы оборудования, некомпетентность сотрудников, нарушения в работе ПО.

В области защищённости сетей и систем принят национальный стандарт Российской Федерации [38]. В нём рассмотрена совокупность мер, направленных на предотвращение:

- несанкционированного доступа;
- отказа в обслуживании;
- искажения и потери данных;
- повреждения критически важных систем и информационных объектов [38].

Учитывая, что внешние дестабилизирующие факторы являются доминирующими, необходимо особое внимание уделять эксплуатационным рискам, вызванным реализацией совокупности дестабилизирующих факторов.

Целенаправленные действия на информационную инфраструктуру влияют на ключевые свойства безопасности ТКС ТКФС, такие как:

- конфиденциальность – раскрытие команд управления приводит к возможности их искажения;
- целостность – реализация подмены данных;

- доступность – дестабилизирующий фактор «Отказ в обслуживании» приводит к полной остановке обмена данными;
- достоверность – подмена источников выработки управляющих данных [39-41].

Классификация дестабилизирующих факторов ТКС ТКФС включает: подмену объектов, изменение данных, отказ от легитимности, разглашение данных, отказ в обслуживании [39,42].

В связи с архитектурой ТКФС, выделяются основные уровни ТКФС, на которые возможна реализация дестабилизирующих факторов на информационную инфраструктуру (рисунок 1.4):

- на устройства, датчики, сенсоры;
- на вычислительные компоненты;
- на линии связи, сетевые элементы ТКС.

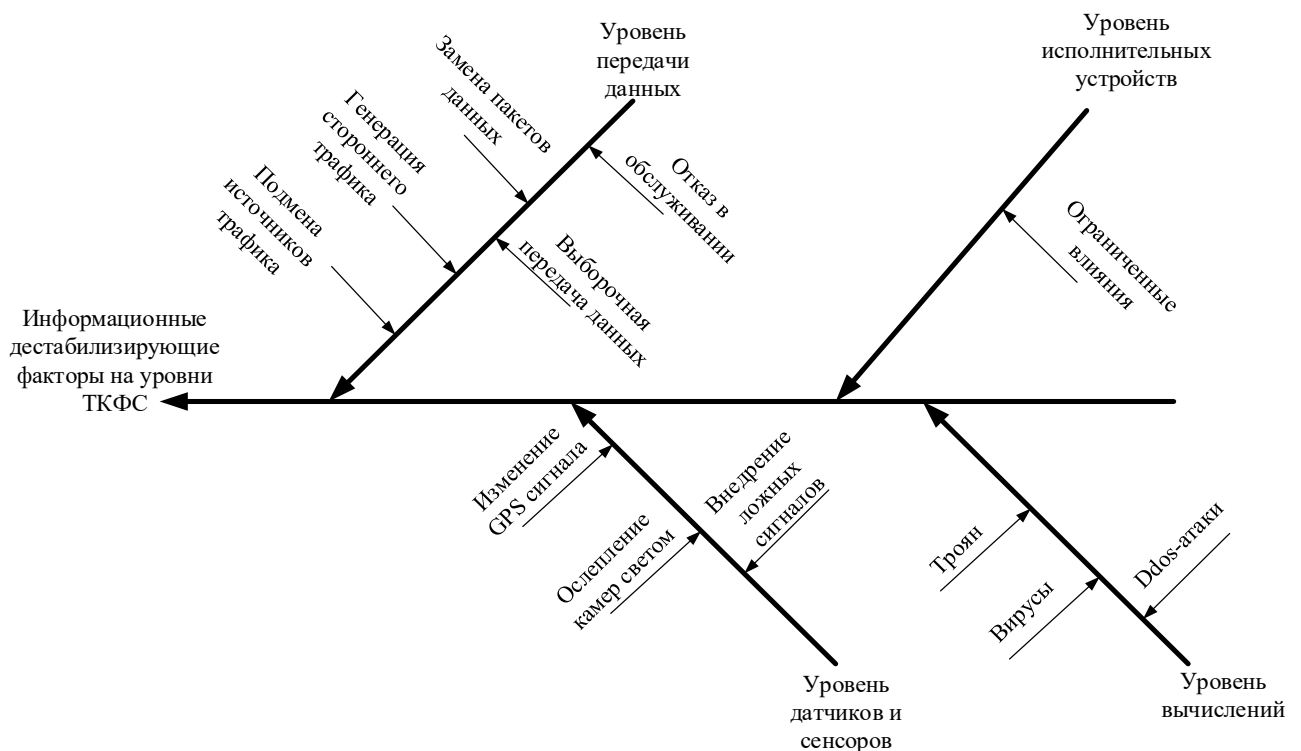


Рисунок 1.4 – Диаграмма информационных дестабилизирующих факторов на уровни ТКФС

Среди них особое внимание заслуживает распределенный процесс «Отказ в обслуживании». Он признается наиболее критичным вследствие прямого влияния

на процесс функционирования ТКС ТКФС. Его реализация приводит к нарушению передачи команд управления [39,43].

Он направлен на истощение ресурсов сетевых элементов: пропускной способности каналов передачи данных, вычислительных мощностей серверов, буферов маршрутизаторов. Главной целью является блокировка легитимного трафика (рисунок 1.5).

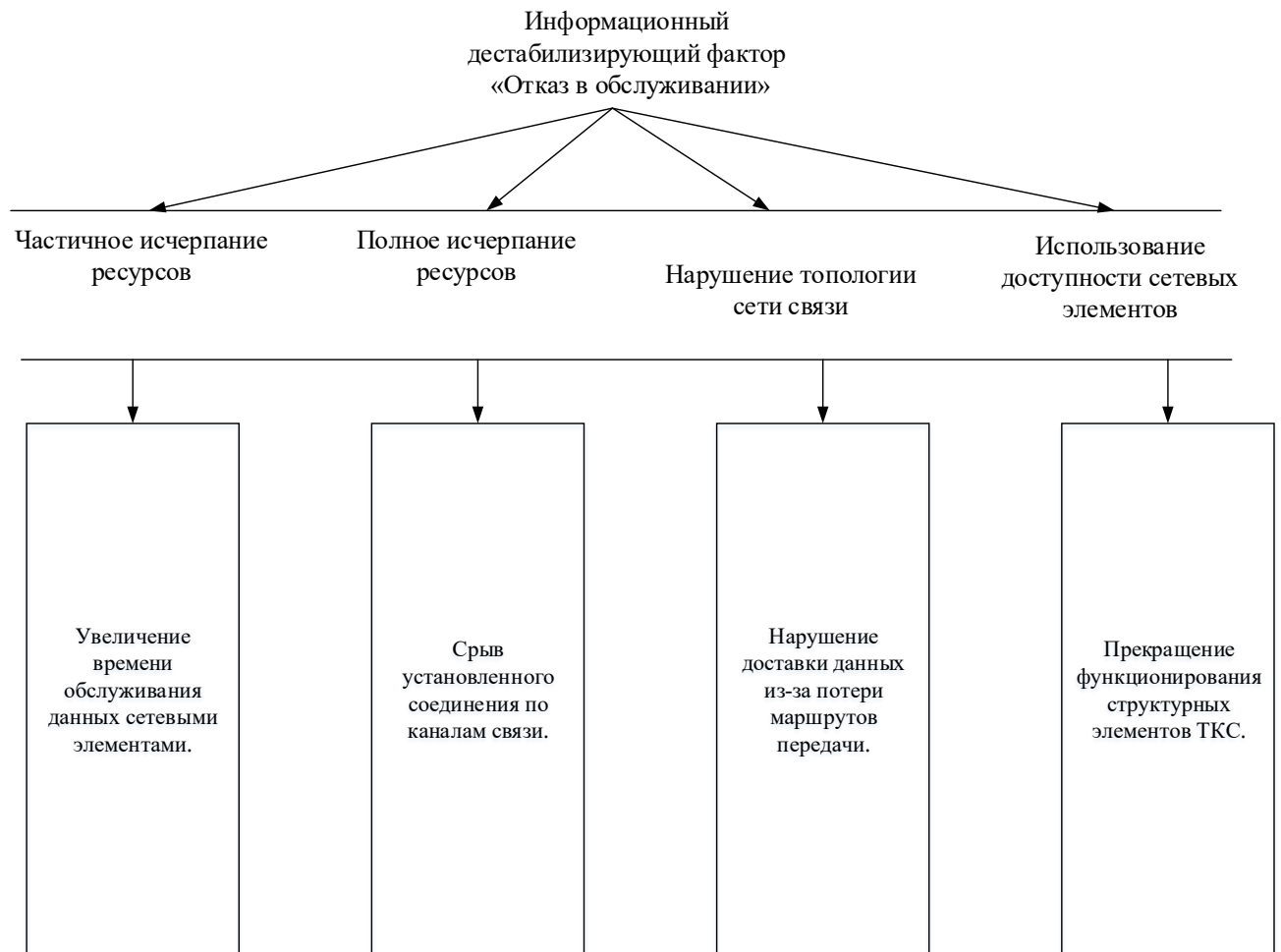


Рисунок 1.5 – Последствия реализации информационного дестабилизирующего фактора «Отказ в обслуживании»

Его реализация требует низких ресурсов и технических компетенций по сравнению с другими видами [44, 45]. При этом эффективность возрастает при наличии структурных уязвимостей в ТКС ТКФС.

Основные причины уязвимостей представлены на рисунке 1.6 [19].



Рисунок 1.6 – Основные причины уязвимостей

Ввиду распределённой структуры ТКС ТКФС, физические дестабилизирующие факторы проявляются в следующих формах:

- повреждение линейных сооружений связи, в первую очередь оптоволоконных кабелей. Перерезание и выемка кабеля из грунта приводят к полному разрыву канала передачи данных. В результате нарушается процесс передачи управляющих команд;
- вывод из строя узлов коммутации, базовых станций и ретрансляторов;
- влияние на оборудование узлов коммутации, путём повреждения источников бесперебойного питания, отключения резервных линий.

Таким образом, физические причины нарушают процесс передачи данных подвижным объектам управления и их следует рассматривать не как второстепенный фактор, а как наиболее вероятный.

В основном существующие СОВ и СУИБ [4, 5] направлены на обнаружение аномалий и флуктуаций трафика. Они позволяют осуществлять мониторинг трафика в реальном времени и выявлять аномалии. СУИБ обеспечивают сбор, анализ и управление событиями. Обе системы в основном сфокусированы на

передаваемой информации, но они не обеспечивают контроль над процессом их передачи. Не позволяют прогнозировать возможные задержки передаваемых данных и оценивать качество функционирования ТКС. Поэтому для ТКС ТКФС требуется дополнительный уровень мониторинга, направленный на прогнозирование возможных дестабилизирующих факторов, оценку текущего и прогнозируемого качества функционирования ТКС. Требуется подсистема принятия решений в случае реализации описанных выше факторов.

Анализ условий показывает, что реализация дестабилизирующих факторов приводит к нарушению перевозочного процесса. Эта цель достигается не столько изменением самих данных, сколько целенаправленным влиянием на сам процесс функционирования ТКС, в результате которого нарушаются ключевые параметры передачи данных – своевременность, доступность и целостность.

Таким образом, с целью оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов требуется разработка частных математических моделей процессов: реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами, восстановления информационного обмена, передачи данных по беспроводным каналам связи, функционирования узлов коммутации в условиях дестабилизирующих факторов. Разработанные частные модели входят в комплексную модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

1.4 Постановка задачи на исследование. Структура исследования и формулировка научной задачи.

Развитие железнодорожного транспорта Российской Федерации неразрывно связано с масштабной цифровизацией и внедрением систем, обеспечивающих высокие уровни автоматизации перевозочного процесса (GoA 3 – GoA 4). Ключевым результатом этого процесса стало появление ТКФС, центральным элементом которых выступает ТКС.

Основной функцией ТКФС является обеспечение управления подвижными объектами на основе сквозных информационно-управляющих технологий, охватывающих процесс передачи данных от центра управления перевозками до подвижного состава.

Следует особо отметить, что согласно [19] ТКФС, как объект ИТС ЖДТ, а также её ТКС, относятся к объектам КИИ. Любое нарушение функционирования ТКС ТКФС может стать причиной аварий и катастроф, длительных остановок перевозочного процесса.

Анализ дестабилизирующих факторов показывает, что ТКС ТКФС ОАО «РЖД» подвержена им за счёт реализации информационных и физических причин. Они направлены на срыв процесса передачи данных объектам управления, свойствами которого являются доступность, целостность и своевременность передачи данных.

Особую опасность представляет синергетический эффект, возникающий при их совместной реализации. Отдельно осуществлённое физическое действие может быть оперативно обнаружено средствами технического мониторинга. Аналогично, информационные дестабилизирующие факторы зачастую блокируются межсетевыми экранами или СОВ. Однако одновременное или последовательное сочетание этих условий значительно увеличивает глубину и тяжесть деструктивных процессов: оно затрудняет их обнаружение, маскирует истинные причины нарушения, увеличивает время передачи данных высоких категорий срочности и существенно увеличивает время восстановления работоспособности ТКС. Таким образом, дестабилизирующие факторы являются не просто суммой процессов, а представляет собой целенаправленное, скоординированное воздействие, направленное на полную потерю управления ТКС ТКФС и, как следствие, на срыв перевозочного процесса.

Вместе с тем, существующие подходы по мониторингу ТКС, преимущественно сосредоточены на защите передаваемых данных [46]. Согласно [36], для этого используются средства межсетевого экранирования. Однако, их

наличие не обеспечивает качество функционирования процесса передачи данных ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Более того, в результате проведённого анализа состояния инфраструктуры ТКС ТКФС ОАО «РЖД» выявлены следующие недостатки:

- обеспечение мониторинга и администрирования ТКС ТКФС осуществляется за счёт применения стандартных средств: СОВ, СУИБ и средств межсетевого экранирования;
- используется стандартный комплекс ЕСМА, не адаптированный под специфику ТКФС и не способный оценивать качество функционирования ТКС в реальном времени;
- широко применяется устаревшее программное обеспечение;
- не определено нормативное положение ТКС ТКФС, отсутствует чёткое закрепление её принадлежности к сетям ОТН или ОБТН. Это обуславливает передачу разнородной информации по единой инфраструктуре ТКС без строгой сегментации трафика;
- элементы ТКС ТКФС интегрированы в сети общего пользования, что расширяет перечень возможных уязвимостей и создаёт возможность распространения дестабилизирующих факторов из сторонних сегментов инфраструктуры.

В связи с вышеописанным можно сформулировать научную задачу исследования и основные направления её решения.

ТКФС ОАО «РЖД» обеспечивает управление перевозочным процессом на высоких уровнях автоматизации (GoA 3 – GoA 4). Системообразующую роль в её архитектуре играет ТКС, обладающая рядом принципиальных отличий от традиционных ТКС ОАО «РЖД». К таким особенностям относятся: критичность к задержкам передачи данных, обеспечение непрерывности управления за счёт сквозной связи между физическими объектами и вычислительными компонентами, передача разнородных информационных потоков различных категорий срочности. В связи с этим к ТКС ТКФС предъявляются повышенные требования по оперативности доставки, достоверности передаваемых данных, надёжности сети и

её элементов, а также по применению современных систем мониторинга, способных оценивать качество функционирования в реальном времени. Дестабилизирующие факторы направлены на достижение нарушения функционирования ключевых элементов транспортной инфраструктуры. Учитывая системообразующую роль ТКС, основные действия сосредоточены на срыве процесса доставки команд управления. Даже кратковременные задержки передаваемых данных могут привести к срыву перевозочного процесса а, в крайних случаях, к авариям или катастрофам. Это подчёркивает необходимость обеспечения своевременной доставки данных.

Решение поставленной научной задачи исследования осуществляется за счёт:

1. Анализа условий функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
2. Разработки комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов;
3. Разработки методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов;
4. Разработки научно-технических предложений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

По первому пункту:

- определение роли и места ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- выявление особенностей функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- анализ дестабилизирующих факторов в отношении ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

По второму пункту:

- разработка вербальной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов;
- разработка частной модели процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами;

- разработка частной модели процесса восстановления информационного обмена;
- разработка частной модели процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- разработка частной модели процесса функционирования узла коммутации ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов;
- разработка частной модели процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

По третьему пункту:

- выбор и обоснование показателя и критерия оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- определение структуры и содержания методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- анализ результатов оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- разработка методики выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- определение основных направлений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

По четвертому пункту:

- вариант организации структуры выделенной ТКС ТКФС ОАО «РЖД» с использованием технологии MPLS L3VPN;
- структура программного модуля СМППР ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- анализ результатов оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» при реализации разработанных научно-технических предложений.

На основании этого актуализировалась разработка структурно-логической схемы научного исследования (рисунок 1.7), которая отражает этапы решения поставленной научной задачи.

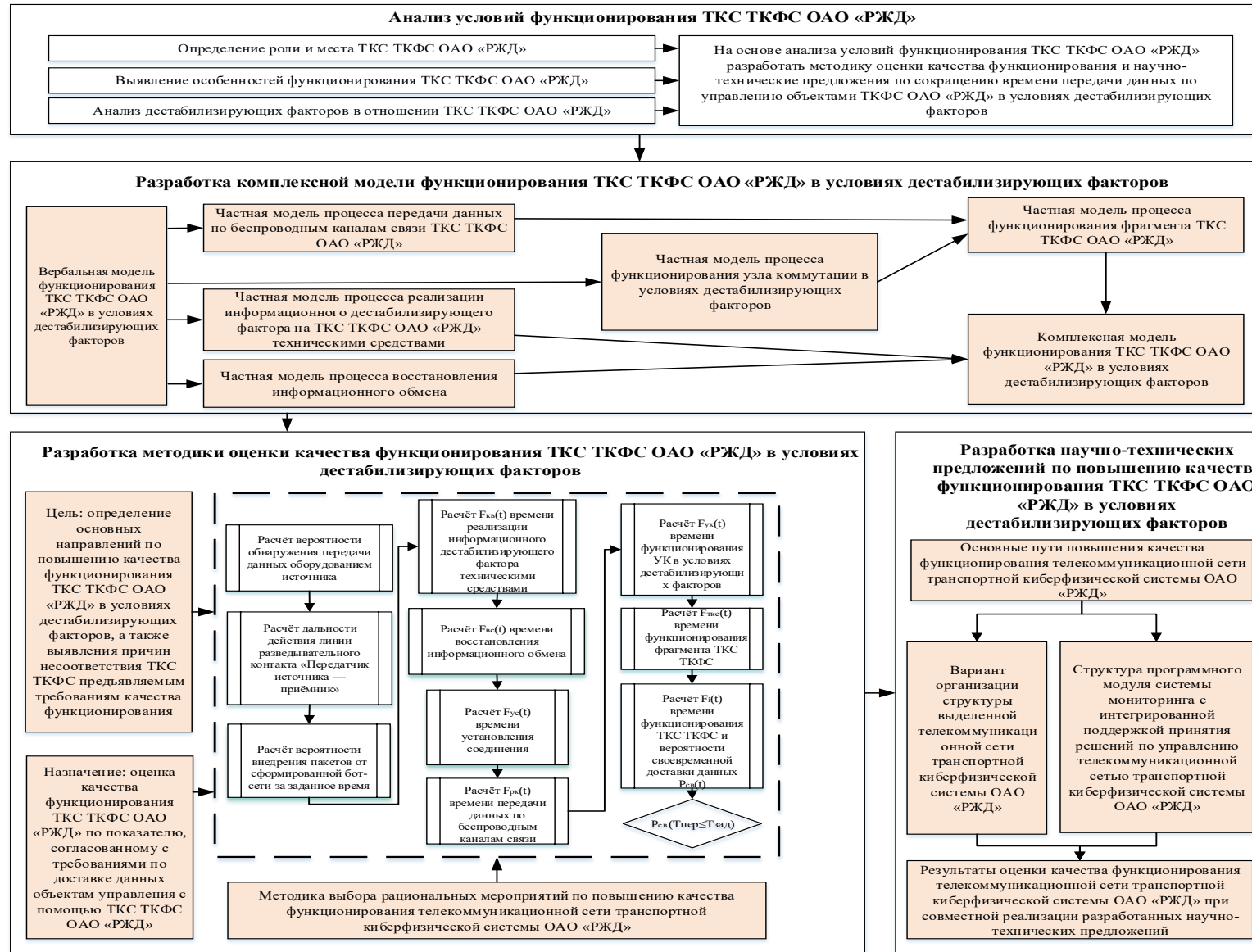


Рисунок 1.7 – Структурно-логическая схема научного исследования

Поскольку дестабилизирующие факторы направлены на нарушение процесса функционирования ТКС ТКФС, традиционные СОВ и СУИБ оказываются недостаточными. Их архитектура ориентирована преимущественно на обеспечение конфиденциальности и целостности информации, что не позволяет оперативно выявлять внешние и внутренние факторы, целенаправленно нарушающие своевременность и доступность передачи управляющих команд.

Выявленные особенности функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов – обусловили необходимость разработки комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Такая модель должна учитывать не только факт наличия причин дестабилизации, но и их влияние на ключевые параметры качества функционирования сети.

Выводы по главе 1

1. Анализ развития интеллектуальных транспортных систем ЖДТ показывает, что с переходом к высоким уровням автоматизации (GoA 3 – GoA 4) ТКС перестала выполнять вспомогательную роль и приобрела статус системообразующего элемента ТКФС. Традиционные ТКС ОАО «РЖД» ориентированы на передачу служебной и административной информации, ТКС ТКФС обеспечивают функциональную целостность всей системы за счёт реализации сквозной связи между физическими объектами и вычислительными элементами, реализуя параллелизм управляющих и исполнительных процессов. В этих условиях устойчивость перевозочного процесса определяется не просто наличием данных, а качеством самого процесса их передачи. Таким образом, роль ТКС существенно изменилась: из второстепенного компонента она превратилась в центральный объект управления, мониторинга и администрирования.

2. ТКС ТКФС ОАО «РЖД» обладает принципиально новой архитектурой по сравнению с традиционными сетями ОАО «РЖД». Её построение основано на четырехуровневой распределённой структуре – магистральном, региональном,

объектовом и мобильном уровнях. Такая архитектура позволяет обеспечить связь между центрами управления, стационарной инфраструктурой и подвижным составом, интегрируя ТКС непосредственно в управляющий контур ТКФС. Однако ключевым недостатком текущей организации является отсутствие чёткого нормативного закрепления статуса ТКС ТКФС: в действующих документах не определено, относятся ли она к сетям ОТН или ОБТН. Это приводит к передаче критических потоков управляющей информации совместно со служебным трафиком без строгой сегментации, что противоречит логике функционирования ТКФС. Таким образом, при проектировании и организации ТКС ТКФС необходимо обеспечивать обязательную изоляцию трафика, приоритизацию управляющих команд и резервирование каналов передачи данных на архитектурном уровне.

3. Условия функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» формируются под влиянием двух взаимосвязанных факторов: жёстких нормативных требований и возможных дестабилизирующих факторов. С одной стороны, даже кратковременные задержки или искажения управляющих команд могут привести к нарушению перевозочного процесса а, в крайних случаях, к авариям или катастрофам. С другой – функционирование сети происходит в условиях структурной уязвимости: гетерогенной среды передачи данных, распределённой инфраструктуры. Также отнесение ТКС ТКФС к объектам КИИ делают её целью для гибридных деструктивных процессов. В этих условиях качество функционирования определяется не наличием средств мониторинга, а способностью системы сохранять ключевые свойства.

4. Анализ информационных и физических дестабилизирующих факторов в отношении инфраструктуры ОАО «РЖД» показывает, что они всё чаще проявляются в виде гибридных влияний, сочетающих информационные и физические действия. Именно совместная реализация этих факторов позволяет преодолеть механизмы мониторинга, которые эффективны против каждого вида дестабилизирующих процессов по отдельности. Гибридное влияние факторов – это не просто их сумма, а более глубокое деструктивное действие, направленное не на компрометацию данных, а на полный срыв процесса передачи управляющей

информации. При этом существующие средства мониторинга и администрирования ориентированы на защиту информации, но не контролируют качество функционирования и не способны прогнозировать последствия гибридных дестабилизирующих факторов. Это требует перехода от пассивного мониторинга к активному управлению ТКС. В этих условиях для выявления основных закономерностей функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», необходима разработка комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

5. Научная задача исследования принципиально отличается от ранее известных подходов к обеспечению устойчивости ТКС ЖДТ. Ранее основное внимание уделялось обеспечению конфиденциальности и целостности передаваемых данных, тогда как в условиях высокой автоматизации главным объектом наблюдения становится не информация, а сам процесс функционирования ТКС. Новизна задачи заключается в том, что она направлена на оценку и повышение качества функционирования ТКС ТКФС как управляющего контура, где критическим параметром является своевременность доставки данных. Решение достигается не за счёт усиления отдельных средств мониторинга, а через разработку инструментов для проведения оценки качества функционирования ТКС ТКФС, а также снижения времени доставки управляющих команд в условиях дестабилизирующих факторов. В связи с этим актуализируется разработка методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Методика позволит проводить оценку и анализ качества функционирования ТКС ТКФС и выбирать рациональные мероприятия по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Кроме того, актуализируется разработка научно-технических предложений, направленных на повышение качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

ГЛАВА 2 КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

2.1 Вербальная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

Процесс функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» представляет собой непрерывный цикл обмена информацией между подвижным составом и центрами управления движением. Данный обмен обеспечивается через многоуровневую архитектуру ТКС, включающую магистральный, региональный, объектовый и мобильный уровни. Нарушение функционирования ТКС приводит к срыву обмена данными, что, в свою очередь, вызывает потерю управления движением поездов.

Передача данных осуществляется по разнородной среде, используются беспроводные каналы связи, проводные каналы связи, базовые станции, узлы коммутации. При этом процесс передачи должен строго соответствовать требованиям по своевременности, целостности и доступности передаваемого трафика [30].

В последние годы наблюдается существенный рост числа дестабилизирующих факторов на инфраструктуру ОАО «РЖД». Чаще всего реализуется совокупность действий, сочетающие информационное и физическое влияние. Следует особо отметить, что целью является не компрометация данных как таковых, а дестабилизация перевозочного процесса, реализуемого ТКФС, путём нарушения процесса функционирования ТКС [47, 48].

Для успешной реализации дестабилизирующих факторов источник их реализации выполняет предварительный этап сбора информации, в ходе которого формирует полную картину целевой инфраструктуры (рисунок 2.1).

Сбор и анализ информации направлен на:

- получение данных о структуре трафика, его интенсивности и каналах передачи;
- выявление источников генерации трафика, уязвимостей программного и аппаратного обеспечения, а также определение топологии сетевых элементов ТКС [49].

Собранная информация позволяет выявить уязвимости, после чего разработать скоординированный план реализации дестабилизирующих факторов, направленный на максимальное нарушение качества функционирования ТКС.



Рисунок 2.1 – Структура выбора и формирования дестабилизирующих факторов

В свою очередь стандартные аппаратно-программные средства, такие как СОВ и СУИБ обнаруживают несанкционированные влияния на процесс передачи данных. Но как показывает практика, меры, принимаемые СОВ и СУИБ вырабатываются с задержками, а чаще всего уже после срыва информационного обмена [50].

Соответственно для обеспечения мониторинга за сетью необходимо использовать аппаратно-программный комплекс [6], который реализует эту задачу. Таким комплексом является ЕСМА [34,35] применяемая в рамках ОАО «РЖД». Данная система представляет собой автоматизированную систему, направленную на сбор информации о состоянии сети связи. ЕСМА обеспечивает наблюдение за электрическими параметрами сетевых элементов. Данные об этих параметрах передаются в ЕСМА по каналам связи ТКС, это приводит к увеличению трафика, циркулирующего в сети, что вызывает задержки команд управления объектов ТКФС. В случае большого количества сетевых элементов и каналов связи длительность цикла управления ТКС ТКФС ОАО «РЖД» становится недопустимо большой [51].

Собранные данные о состоянии ТКС анализируются ЕСМА, осуществляется идентификация сетевых элементов ТКС, идентификация дестабилизирующих факторов соответствующей подсистемой. В случае их обнаружения осуществляется выбор мер восстановления и их реализация, после чего функционирование ТКС и передача данных восстанавливается.

В свою очередь источник дестабилизирующих факторов хорошо оснащён технически, имеет чёткую цель и задачу. Необходимо отметить, что главной целью является нарушение перевозочного процесса, в отношении ТКФС это достигается путём срыва процесса передачи данных.

Реализация информационных дестабилизирующих факторов может делиться на различные типы. В отношении ТКС ТКФС наиболее эффективным считается – «Отказ в обслуживании» [26]. Процесс передачи данных нарушается за счёт отправки нелегитимного трафика в каналы ТКС, это приводит к блокированию каналов связи и нарушает работу сетевых элементов.

Для проведения анализа качества функционирования на рисунке 2.2 представлена вербальная модель процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

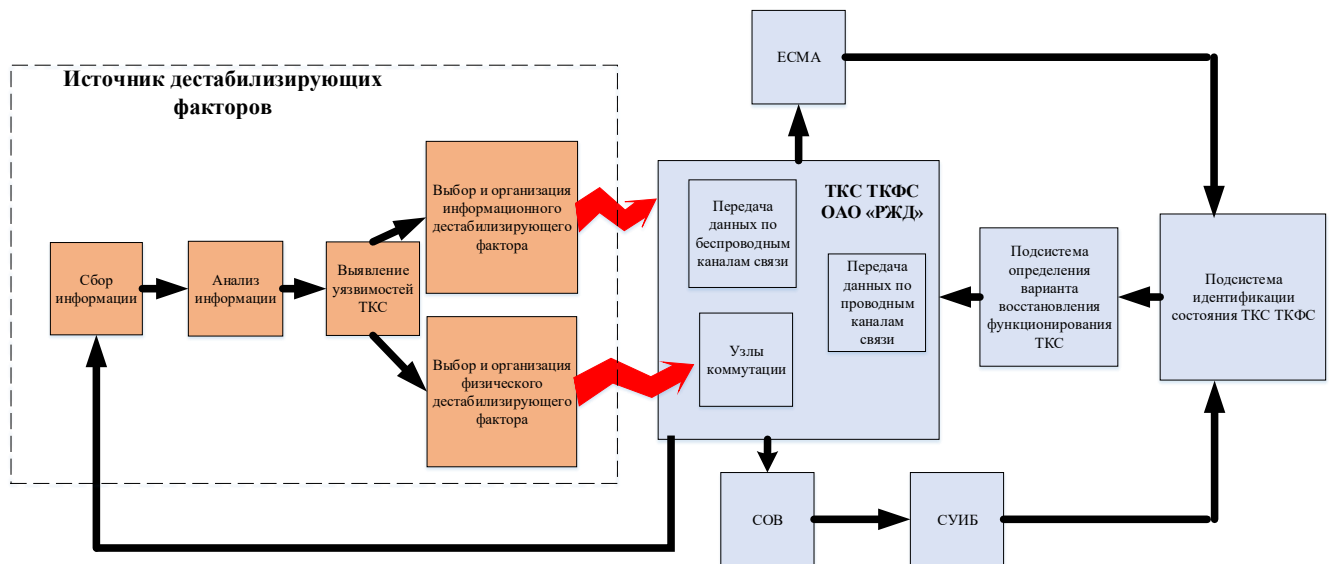


Рисунок 2.2 – Вербальная модель процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

Для выявления особенностей процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, была поставлена задача разработки комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов на основе:

- частной модели процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- частной модели процесса функционирования узла коммутации (УК) в условиях дестабилизирующих факторов;
- частной модели процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами;
- частной модели процесса восстановления информационного обмена;
- частной модели процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»;
- также ряда частных моделей процессов передачи данных по проводным каналам связи и ожидания обслуживания пакетов данных различных категорий срочности.

На рисунке 2.3 представлена структурная схема комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов [52].

В процессе разработки комплексной модели использованы нормативные модели и методики оценки качества функционирования, а также исходные данные, характеризующие возможного внешнего источника.

Результаты моделирования процессов приёма кадра входящего в связь (КВС), уровня принимаемого сигнала (УПС), качества принимаемого сигнала (КПС), Дистанции, приёма сигналов после регулирования мощности, а также передачи команд управления, нейтрализации их подмены и выработки команд на поддержание установленного соединения послужили исходными данными для разработки частных моделей установления соединения, передачи команд управления и поддержания связи. Полученные частные модели стали исходными данными для разработки модели процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Результаты моделирования процессов обслуживания пакетов данных, снижения вычислительной способности УК позволили разработать модель процесса функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов.

Моделирование частных процессов анализа трафика, сканирования протоколов, вскрытия сети, определения её сетевых элементов, а также формирования бот-сети и блокировки сетевых элементов послужили исходными данными для разработки частной модели процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами. В свою очередь, исходными данными для разработки частной модели процесса восстановления информационного обмена стали результаты определения команды управления телекоммуникационным оборудованием, проверки принятой команды, а также выбора мер восстановления и применения мер.

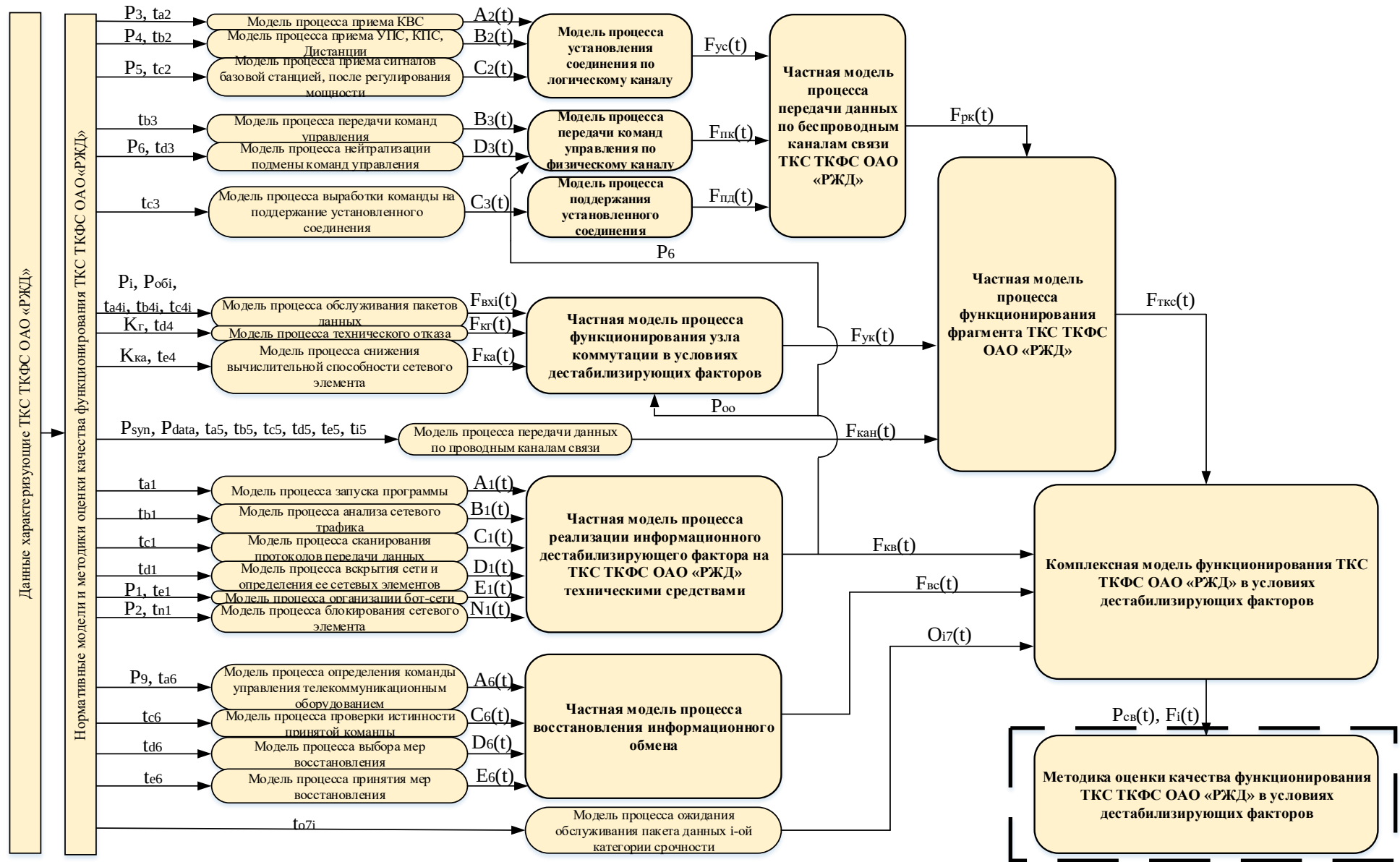


Рисунок 2.3 – Структурная схема комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

На первом этапе необходимо разработать частные модели процессов передачи данных по беспроводным и проводным каналам связи, а также функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов. Полученные результаты послужат основой для разработки частной модели функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД». На втором этапе требуется разработать частные модели процессов функционирования указанного фрагмента ТКС, реализации на него информационного дестабилизирующего фактора техническими средствами, восстановления информационного обмена, а также ожидания обслуживания пакетов данных различных категорий срочности. Совокупность разработанных моделей станет исходной базой для разработки комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Разработка математических моделей позволит проводить оценку качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Все разрабатываемые частные математические и комплексная модели разработаны с использованием единого математического аппарата: метода топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС) [53, 54], который в целях исследования был доработан для определения эквивалентных функций для узлов «Включающее И», «Включающее ИЛИ». Кроме того, необходимо использовать метод двухмоментной аппроксимации с последующим получением неполной гамма-функции [55]. Это позволит использовать в качестве функций распределения исследуемых процессов неполную гамма-функцию, что приведет к реализации циклической процедуры метода двухмоментной аппроксимации [72].

Метод ТПСС отличается от других более высоким уровнем детализации процессов. Это позволяет описывать любые процессы, протекающие в телекоммуникационных сетях, особенно в условиях реализации внешних и внутренних факторов [53, 54, 56].

Он используется для анализа процессов, сопровождающих передачу данных. Каждый процесс характеризуется собственной функцией распределения вероятностей [53, 54, 56].

Основная идея метода заключается в представлении исследуемого процесса в виде стохастической сети, последующем свёртывании множества её ветвей в одну эквивалентную, а также в определении эквивалентной функции, начальных моментов и функции распределения случайного времени реализации всего процесса [54].

Ключевые преимущества ТПСС:

- возможность детального описания сложных многоэтапных процессов;
- чёткая физическая интерпретируемость на всех этапах моделирования, что обеспечивает контроль за адекватностью модели реальному процессу [53, 53, 56].

При этом отдельные операции в рамках моделируемых процессов выполняются за случайное время. Для их учёта в рамках ТПСС применяются преобразования Лапласа, что позволяет корректно интегрировать временные характеристики в общую модель.

Таким образом, представленная вербальная модель процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, позволяет разработать комплексную модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Ввиду сложности функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», требуется декомпозировать данный процесс на несколько подпроцессов: функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД», реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС техническими средствами, восстановления информационного обмена. Кроме того, процесс функционирования фрагмента ТКС не менее сложен, его требуется декомпозировать на подпроцессы: передачи данных по беспроводным каналам связи, функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов и передачи данных по проводным каналам связи.

2.2 Частная модель процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами

Как показал анализ, проведённый в первой главе, наиболее вероятным внешним условием на ТКС ТКФС со стороны источника по сравнению с другими ТКС является «Отказ в обслуживании». Для реализации процесса осуществляется:

1. Сбор данных о уязвимостях ТКС;
2. Вскрытие ТКС, получение доступа к каналам связи и сетевым элементам;
3. Реализация процесса.

Сбор данных о уязвимостях осуществляется с помощью технических средств обнаружения [57].

Основные типы этого процесса реализуются путём отражения и усиления трафика. Эту структуру можно описать так: внешний источник реализует процесс путём отправки запросов на серверы, вынуждая их ретранслировать эти запросы уже на узлы коммутации, в свою очередь узлы коммутации из-за высокого количества запросов перестают быть доступным для легитимного объекта и при необходимости передачи легитимного трафика узлы не способны осуществить процесс установления соединения с подвижным объектом или наоборот при запросе на установление соединения от подвижного объекта узлы коммутации не могут ответить на этот запрос.

«Отказ в обслуживании» также реализуется на основе принципа отражения и усиления. При успешной реализации, узел коммутации перестает отвечать на запросы установления соединения от легитимных объектов. Это позволяет полностью занять канальную ёмкость, которая есть у узла коммутации.

Моделированием таких процессов занимались многие учёные, особенно можно выделить работу [58]. На основе полученных результатов была разработана модифицированная модель информационного дестабилизирующего фактора «Отказ в обслуживании».

Разработанная модель отличается тем, что осуществляется согласованная реализация процессов: анализа сетевого трафика, сканирования протоколов передачи данных, сканирования сети и узлов коммутации. Модель учитывает возможность формирования тяжёлых пакетов на сетевых элементах, являющихся объектами бот-сети. Модель позволяет определять функцию распределения времени реализации процесса. На рисунке 2.4 представлена блок-схема этапов реализации процесса «Отказ в обслуживании».

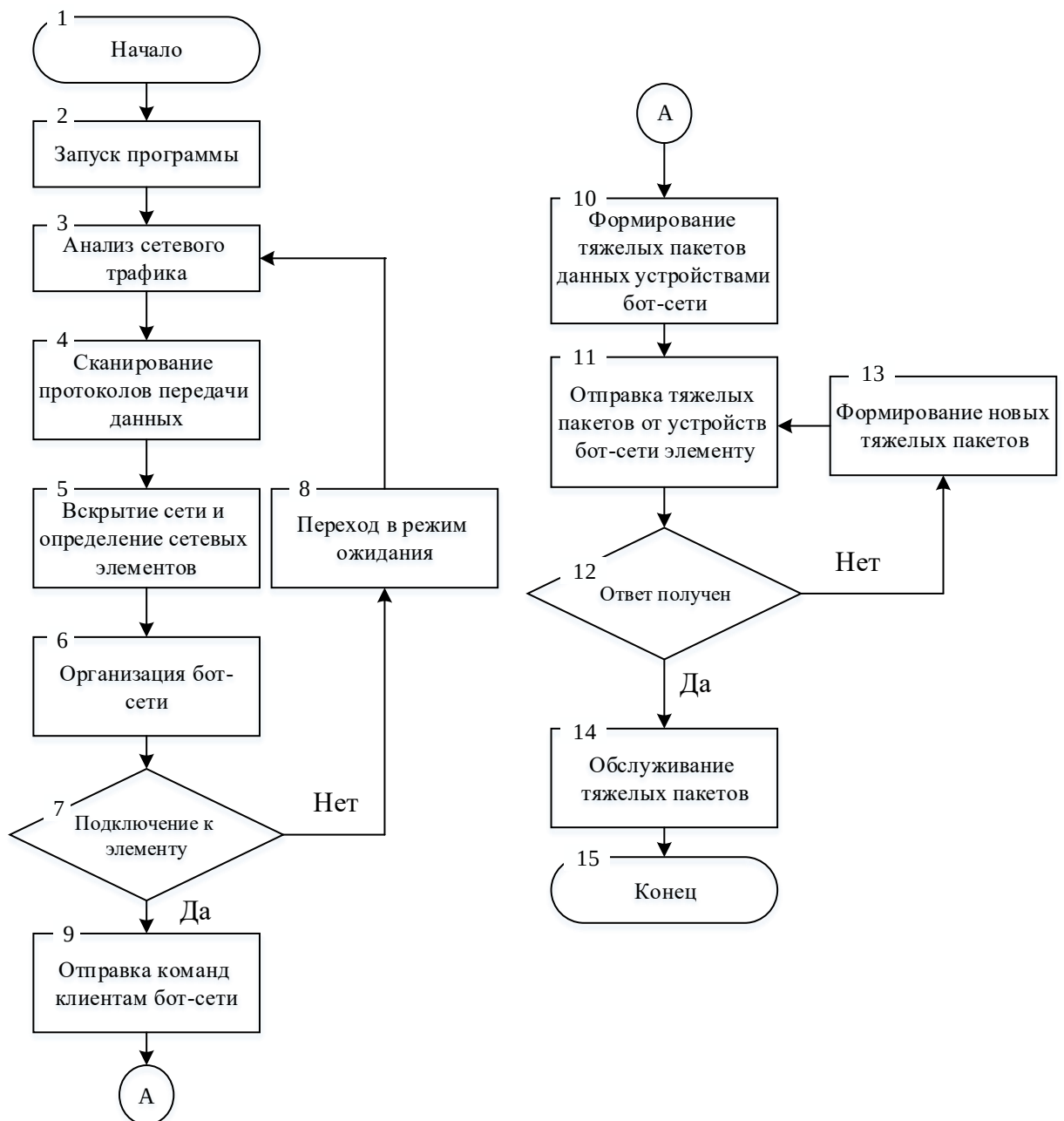


Рисунок 2.4 – Блок-схема реализации этапов информационного дестабилизирующего фактора «Отказ в обслуживании»

С целью оценки времени, необходимого для реализации процесса «Отказ в обслуживании», предлагается следующая постановка задачи.

Постановка задачи.

Пусть имеется ТКС ТКФС, положим, что функционирование узлов коммутации осуществляется в условиях дестабилизирующих факторов.

Для реализации источник осуществляет запуск и настройку программы информационного воздействия за случайное время t_{a1} с функцией распределения (ФР) $A_1(t)$. Анализ трафика выполняется в течение случайного времени t_{b1} с ФР $B_1(t)$. При этом источник получает информацию об используемых протоколах передачи данных, данный процесс реализуется за случайное время t_{c1} с ФР $C_1(t)$. С целью анализа архитектуры ТКС осуществляется сканирование сети связи и определение узлов коммутации за случайное время t_{d1} с ФР $D_1(t)$. После получения необходимой информации осуществляется формирование бот-сети, состоящей из клиентов, за случайное время t_{e1} с ФР $E_1(t)$. Далее осуществляется подключение к серверу одного из узлов коммутации ТКС. С вероятностью P_1 подключение успешно реализуется, в противном случае, с вероятностью $(1 - P_1)$, программа переходит в режим ожидания за случайное время t_{i1} с ФР $I_1(t)$. Расчёт P_1 выполняется с помощью методики, основанной на использовании коэффициента важности элемента [59, 60].

После подключения к серверу реализуется отправка команд клиентам бот-сети за случайное время t_{j1} с ФР $J_1(t)$. После получения команды управления на формирование тяжёлых пакетов данных устройства бот-сети осуществляют их формирование за случайное время t_{k1} с ФР $K_1(t)$, после чего начинается отправка этих пакетов за случайное время t_{l1} с ФР $L_1(t)$. При этом сервер узла коммутации может не отправить ответ на полученные пакеты, с вероятностью $(1 - P_2)$ ответ не будет получен, и через случайное время t_{m1} с ФР $M_1(t)$ осуществляется формирование новых пакетов. В случае ответа сервера, с вероятностью P_2 сервер начнет обслуживание тяжёлых пакетов за случайное время t_{n1} с ФР $N_1(t)$, после

чего утрачивает способность обеспечивать функционирование узла коммутации сети ТКС [60].

Требуется определить ФР $F_{кв}(t)$ времени реализации информационного дестабилизирующего фактора «Отказ в обслуживании» техническими средствами [60].

При моделировании вводятся следующие ограничения и допущения:

- сбор информации о ТКС осуществляется с использованием технических средств;
- данные о уязвимых узлах и сетевых элементах известны внешнему источнику;
- вероятности, соответствующие ветвям стохастической сети, определяются известными методами [28, 31, 44, 45, 61, 62];
- случайное время реализации частных процессов характеризуются экспоненциальным распределением [54, 56].

Решение.

Стохастическая сеть рассматриваемого процесса представлена на рисунке 2.5.

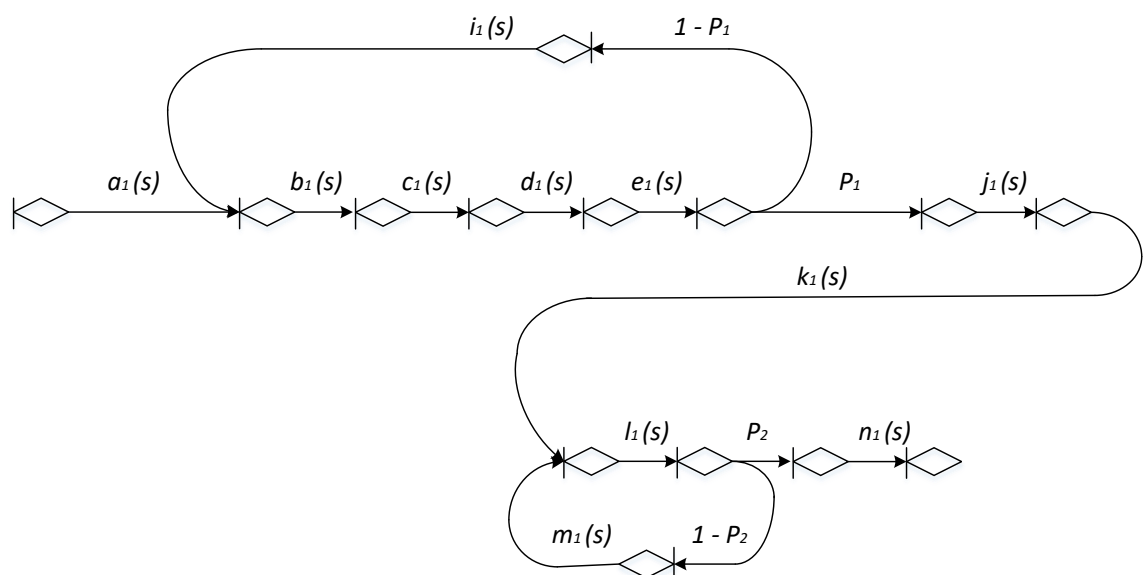


Рисунок 2.5 – Стохастическая сеть процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами

На рисунке обозначено:

- $a_1(s), b_1(s), c_1(s), d_1(s), e_1(s), i_1(s), j_1(s), k_1(s), l_1(s), m_1(s), n_1(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) ФР длительности запуска и подготовки программы, времени анализа сетевого трафика, времени получения информации о используемых протоколах, времени вскрытия сети и определения узлов коммутации, времени формирования бот-сети, времени перехода в режим ожидания, времени отправки команд управления клиентам бот-сети, времени формирования устройствами бот-сети тяжёлых пакетов, времени отправки пакетов данных, времени формирования новых тяжёлых пакетов данных, времени обслуживания тяжёлых пакетов;
- P_1 – вероятность осуществления подключения к серверу;
- P_2 – вероятность получения ответа на отправленные тяжёлые пакеты данных.

Описанные преобразования имеют вид:

$$f(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[F(t)]. \quad (2.1)$$

С использованием уравнения Мейсона $H = 1 + \sum_{k=1}^K (-1)^k Q_k(s) = 0$, где $Q_k(s)$ – эквивалентная функция петель k -го порядка, определяемая как произведение эквивалентных функций ветвей не связанных между собой петель первого порядка, и результата [54], получена эквивалентная функция представленной стохастической сети:

$$Q_{\text{KB}}(s) = \frac{a_1(s)b_1(s)c_1(s)d_1(s)e_1(s)P_1j_1(s)k_1(s)l_1(s)P_2m_1(s)}{1 - \left\{ [(1-P_1)b_1(s)c_1(s)d_1(s)e_1(s)i_1(s)] - [(1-P_2)l_1(s)m_1(s)] + \right.} \quad (2.2)$$

$$\left. + [(1-P_1)b_1(s)c_1(s)d_1(s)e_1(s)i_1(s)(1-P_2)l_1(s)m_1(s)) \right\}$$

На основе метода двухмоментной аппроксимации [64-65], определим первые два момента случайного времени реализации процесса, а также параметры формы и масштаба гамма-распределения:

$$M_{1\text{KB}} = (-1)^1 \frac{d}{ds} \left(\frac{Q_{\text{KB}}(s)}{Q_{\text{KB}}(0)} \right)_{s=0};$$

$$M_{2\text{KB}} = (-1)^2 \frac{d^2}{ds^2} \left(\frac{Q_{\text{KB}}(s)}{Q_{\text{KB}}(0)} \right)_{s=0};$$

$$D_{KB} = M_{2KB} - M_{1KB}^2;$$

$$\alpha_{KB} = \frac{M_{1KB}}{D_{KB}} - \text{параметр формы};$$

$$\mu_{KB} = \frac{M_{1KB}^2}{D_{KB}} - \text{параметр масштаба}.$$

Тогда, функция распределения времени реализации процесса информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами виде неполной гамма-функции имеет вид:

$$F_{KB}(t) = \frac{\alpha_{KB}^{\mu_{KB}}}{\Gamma(\mu_{KB})} \int_0^t t^{\mu_{KB}-1} e^{-\alpha_{KB}t} dt. \quad (2.3)$$

По формуле (2.3) произведены расчёты, результаты которых представлены в виде графиков на рисунке 2.6.

В качестве исходных данных использовались следующие значения времени реализации процессов: $\bar{t}_{a1} = 1 - 10$ с.; $\bar{t}_{b1} = 5$ с.; $\bar{t}_{c1} = 1$ с.; $\bar{t}_{d1} = 1 - 100$ с.; $\bar{t}_{e1} = 5 - 60$ с.; $\bar{t}_{i1} = 1$ с.; $\bar{t}_{j1} = 1 - 10$ с.; $\bar{t}_{k1} = 1 - 5$ с.; $\bar{t}_{l1} = 1 - 24$ с.; $\bar{t}_{m1} = 1 - 12$ с.; $\bar{t}_{n1} = 1 - 5$ с.; P_1, P_2 принимались равными от 0,5 до 0,99. Исходные данные определены с использованием [28, 31, 44, 45, 61, 62].

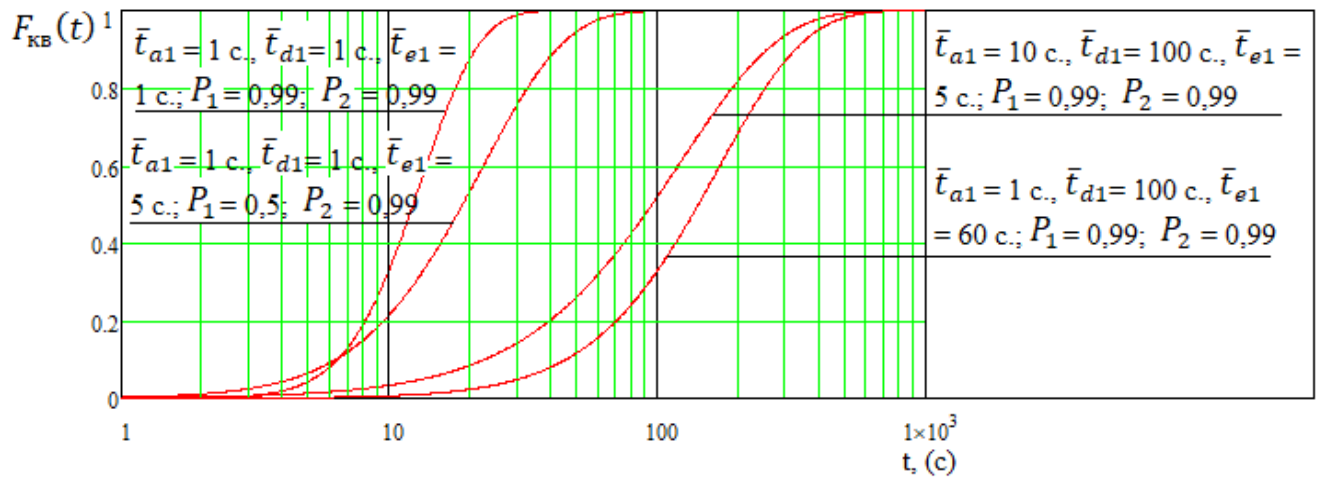


Рисунок 2.6 – Семейство функций распределения времени реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами

Анализ полученных результатов показывает, что разработанная модель является работоспособной, чувствительной к изменению исходных данных, адекватно отображает процесс «Отказ в обслуживании» и позволяет определить его

вероятностно-временные характеристики. Среднее время необходимое для реализации зависит от времени вскрытия сети и времени формирования бот-сети.

Разработка частной модели процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами отражает общий характер влияния процесса на сетевые элементы. Однако для разработки комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов недостаточно учитывать лишь факт реализации. Необходимо также учитывать динамику типового процесса восстановления информационного обмена, закреплённого в руководящих документах, так и особенности функционирования конкретных сетевых элементов. В связи с этим была актуализирована задача разработки частной модели процесса восстановления информационного обмена. Данная модель позволит количественно оценить время необходимое на восстановление процесса передачи данных. Полученные исходные данные формируют основу для последующей разработки моделей более высокого уровня.

2.3 Частная модель процесса восстановления информационного обмена

Существующие СОВ, СУИБ и ЕСМА обеспечивают мониторинг состояния сетевых элементов и реагируют на внешние и внутренние факторы. Но эти системы не ориентированы на оценку качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» и не способны в реальном времени отслеживать показатели оценки качества функционирования. В результате задачи, связанные с оценкой качества функционирования ТКС ТКФС в условиях совокупности дестабилизирующих факторов остаются без должного внимания. Это создает разрыв между их обнаружением и принятием оперативных мер по недопущению срыва процесса передачи данных.

В связи с этим требуется разработка системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений, которая позволит прогнозировать возможные дестабилизирующие факторы, оценивать качество

функционирования ТКС в реальном времени, инициировать превентивные или восстановительные действия по нейтрализации последствий. С этой целью была поставлена задача разработки частной модели процесса восстановления информационного обмена.

Постановка задачи.

В случае реализации процесса «Отказ в обслуживании». Бот-сеть, формируя тяжёлые команды отправляет их в ТКС ТКФС ОАО «РЖД». В свою очередь ТКС обладает системами обнаружения. Блок-схема этапов реализации процесса восстановления продемонстрирована на рисунке 2.7. Система мониторинга определяет команду управления телекоммуникационным оборудованием за случайное время t_{a6} с ФР $A_6(t)$, вероятность принятия команды на исполнения характеризуется P_9 . В случае принятия команды на исполнение, команда исполняется за случайное время t_{b6} с ФР $B_6(t)$, после организуется проверка команды на истинность за случайное время t_{c6} с ФР $C_6(t)$. Осуществляется выбор мер восстановления за случайное время t_{d6} с ФР $D_6(t)$. С обратной вероятностью $(1 - P_9)$, команда исполняется за случайное время t_{b6} с ФР $B_6(t)$. Без её проверки на истинность СОВ реализует выбранные меры восстановления за случайное время t_{e6} с ФР $E_6(t)$.

Требуется определить ФР $F_{6c}(t)$ реализации процесса восстановления информационного обмена.

При моделировании вводятся следующие ограничения и допущения:

- сбор информации о ТКС осуществляется с использованием технических средств;
- вероятности, соответствующие ветвям стохастической сети, определяются известными методами [28, 31, 44, 45, 61, 62];
- случайное время реализации частных процессов характеризуются экспоненциальным распределением.

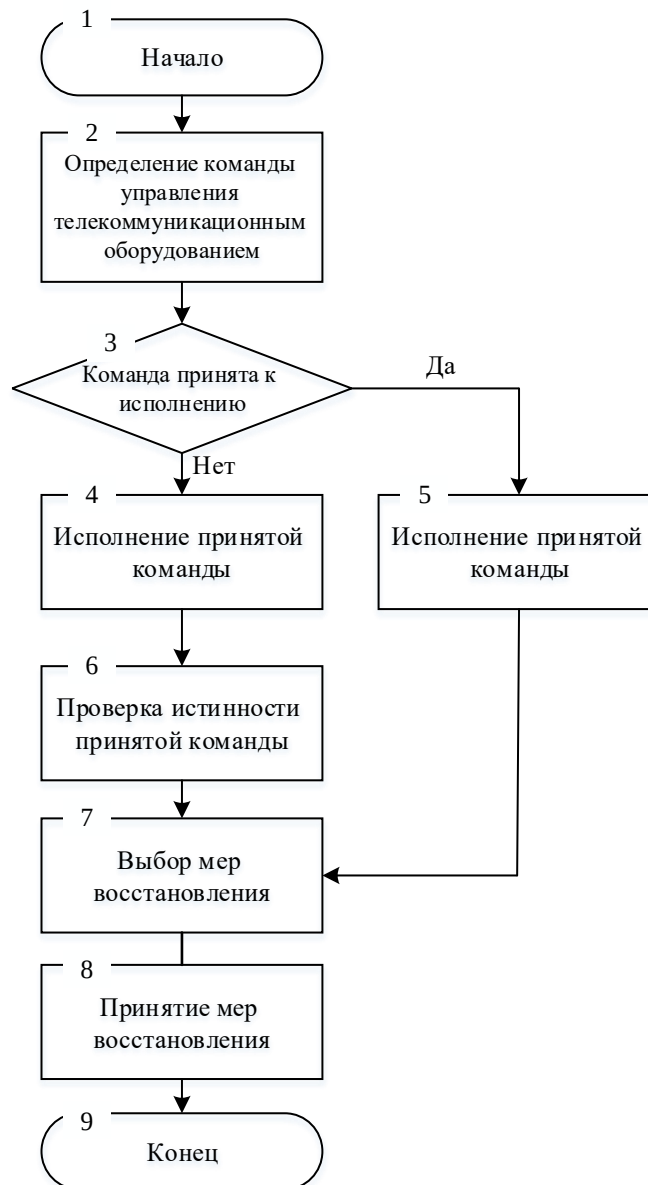


Рисунок 2.7 – Блок-схема этапов реализации процесса восстановления информационного обмена

Решение.

Описанный в постановке задачи процесс представлен в виде стохастической сети на рисунке 2.8.

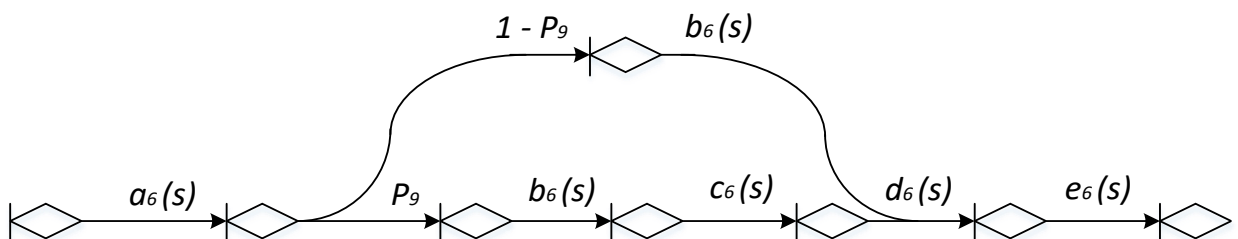


Рисунок 2.8 – Стохастическая сеть процесса восстановления информационного обмена

На рисунке обозначено:

– $a_6(s), b_6(s), c_6(s), d_6(s), e_6(s)$ – ПЛС ФР длительности определения команды управления телекоммуникационным оборудованием, исполнения принятой команды, проверки команды на истинность, выбора мер восстановления, реализации выбранных мер;

– P_9 – вероятность принятия команды на исполнение.

Эквивалентная функция представленной стохастической сети рисунка 2.6, определяемая с использованием топологического уравнения Мейсона примет вид (2.4):

$$Q_{\text{вс}}(s) = a_6(s)[P_9 b_6 c_6 + (1 - P_9) b_6(s)](d_6(s) e_6(s)). \quad (2.4)$$

Определение функции распределения в виде неполной гамма-функции, осуществляется аналогично пункту 2.2 диссертации.

Тогда, функция распределения времени реализации процесса восстановления информационного обмена примет вид (2.5):

$$F_{\text{вс}}(t) = \frac{\alpha_{\text{вс}}^{\mu_{\text{вс}}}}{\Gamma(\mu_{\text{вс}})} \int_0^t t^{\mu_{\text{вс}}-1} e^{-\alpha_{\text{вс}} t} dt, \quad (2.5)$$

где

$\alpha_{\text{вс}}$ - параметр формы;

$\mu_{\text{вс}}$ - параметр масштаба.

По формуле (2.5) произведены расчёты, результаты которых представлены в виде графиков на рисунке 2.9.

В качестве исходных данных использовались следующие значения времени реализации процессов: $\bar{t}_{a6} = 1 - 10$ с.; $\bar{t}_{b6} = 2 - 25$ с.; $\bar{t}_{c6} = 3 - 10$ с.; $\bar{t}_{d6} = 5 - 200$ с.; $\bar{t}_{e6} = 10 - 100$ с.; P_9 принималась равной от 0,5 до 0,99. Исходные данные определены с использованием [28, 31, 44, 45, 61, 62].

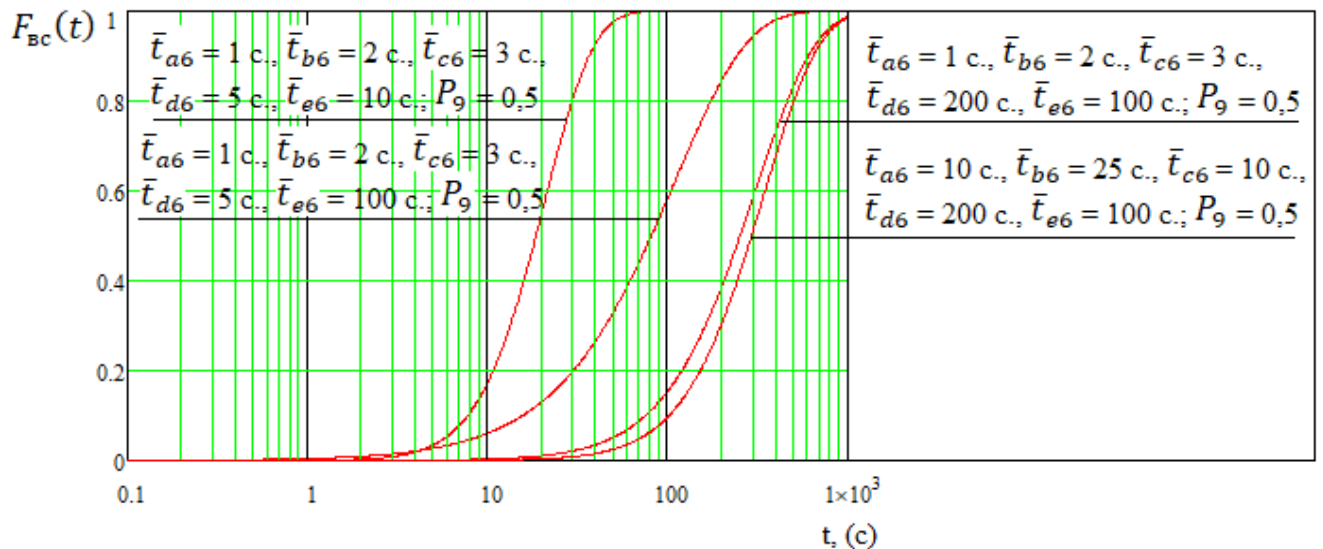


Рисунок 2.9 – Семейство функций распределения времени восстановления информационного обмена при различном времени реализации мер восстановления

Модель показала, что является работоспособной, чувствительной к изменению исходных данных, адекватно отображает процесс восстановления и позволяет определить его вероятностно-временные характеристики. Среднее время реализации процесса восстановления несколько зависит от времени выбора мер восстановления.

Модель процесса восстановления легла в основу разработанного программного модуля СМППР.

После определения дестабилизирующих факторов, наличия частных моделей процесса информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами, процесса восстановления информационного обмена. Актуализируется задача разработки частных математических моделей процессов функционирования элементов ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

2.4 Частная модель процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Беспроводные каналы связи обеспечивают предоставление подвижным объектам следующих услуг:

- коммутация цифровых каналов подвижной станции (ПС);
- обслуживание всех типов вызовов как к подвижным объектам, так и от них в объёме услуг, предоставляемых каналом;
- управление радиоресурсами сети в процессе вызова;
- отработка протоколов сигнализации с подсистемой базовых станций (БС);
- регистрацию и определение местоположения ПС;
- обеспечение непрерывности связи между подвижными объектами как при перемещении подвижной станции из одной сети в другую, так и функции роуминга;
- маршрутизацию входящих вызовов и обмен информацией с регистрами постоянной приписки;
- управление передачей данных между ПС и стационарными абонентами с использованием сигналов тонального набора, передачу коротких сообщений;
- перенос параметров шифрования;
- обработка многочастотной сигнализации и т.д.

Высокая актуальность задач оценки качества функционирования беспроводных каналов связи вызывает широкий интерес среди специалистов в области проектирования и построения сетей подвижной радиосвязи различного назначения.

В работе [66] предложена математическая модель радиоканала с учётом радиоэлектронного подавления, ориентированная на оценку помехозащищённости физического уровня, однако не учитывающая процессы установления и поддержания логических соединений, а также влияние неблагоприятных условий.

Подходы [67-71] основаны на оценке качества функционирования по параметрам радиоканала (пропускная способность, объём успешно переданных

данных), но не позволяют определить время доведения информации — критически важный показатель для систем управления движением.

Таким образом, требуется разработка частной математической модели процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД», учитывающая процессы установления соединения, поддержания установленного соединения и передачи команд управления в условиях реальной сигнально-помеховой обстановки и дестабилизирующих факторов. Модель отличается одновременной реализацией процессов передачи команд управления и поддержания установленного соединения, позволяет определять функцию распределения времени доведения команд управления по беспроводным каналам связи с учётом времени установления соединения, передачи данных и поддержания установленного соединения на время передачи данных. Особенностью данной модели является снятие ограничений на вид используемых распределений случайного времени реализации частных процессов и строгое получение эквивалентной функции фрагмента стохастической сети, содержащего логический узел «Включающее И».

Для разработки данной модели требуется декомпонировать процесс передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД» на подпроцессы: установления соединения, передачи данных и поддержания установленного соединения на время передачи данных.

Описание модели.

Процесс передачи команд управления по беспроводным каналам связи состоит из нескольких этапов. На первом этапе управляющий объект отправляет запрос на установление соединения с управляемым объектом. Если данный запрос не подтверждается, то происходит отправка повторного запроса. В случае успешного установления соединения управляемый объект отправляет подтверждение установления соединения. Далее происходит определение свободного физического канала для передачи команд и установление соединения, что обеспечивается за счет контроля посылки вызова (КПВ). После установления соединения управляющий объект отправляет управляемому данные, содержащие

команды управления. При этом одновременно с передачей команд управления реализуется процесс поддержания соединения. На рисунке 2.10 представлена блок-схема этапов процесса передачи данных по беспроводным каналам связи [72-75].



Рисунок 2.10 – Блок-схема этапов процесса передачи данных по беспроводным каналам связи

Постановка задачи.

Пусть имеется беспроводной канал связи, обеспечивающий передачу команд управления, включающий физический и логические каналы, отвечающие за передачу команд, установление соединения и поддержание установленного соединения на время передачи данных. Данный беспроводной канал связи функционирует в условиях постоянно действующих случайных помех и дестабилизирующих факторов. При этом процесс дестабилизации реализуется успешно с вероятностью P_6 и имеет целью нарушение процесса функционирования ТКС ТКФС.

При необходимости передачи команд управления происходит инициализация процесса установления соединения с использованием логических каналов [75].

Предположим, что процесс установления соединения реализуется успешно за время t_{yc} с функцией распределения $F_{yc}(t)$. После установления соединения реализуется процесс передачи команд управления по физическому каналу за случайное время $t_{пк}$ с функцией распределения $F_{пк}(t)$. При этом процесс передачи данных сопровождается передачей по логическому каналу команд на поддержание установленного соединения в течении случайного времени $t_{пд}$ с функцией распределения $F_{пд}(t)$ [72-75].

Положим, что в некоторый момент времени ПС А инициировала установление соединения с ПС Б. В этом случае, ПС А осуществляет приём сигналов по каналам, обеспечивающим вхождение в связь (КВС) в течение некоторого времени t_{a2} с функцией распределения $A_2(t)$. При этом, с вероятностью P_3 сигнал КВС будет принят правильно с первого раза. В противном случае, с вероятностью $(1 - P_3)$ сигнал КВС будет передан повторно. Если сигнал КВС принят правильно, то от ПС А к обслуживающей его базовой станции (БС) передаются вычисленные значения параметров: уровень принимаемого сигнала (УПС), качество принимаемого сигнала (КПС) и Дистанции, которые с вероятностью P_4 принимаются БС с заданным качеством. С вероятностью $(1 - P_4)$ один из переданных ПС сигналов не будет принят БС с требуемым качеством, тогда в течение некоторого времени t_{b2} с функцией распределения $B_2(t)$ осуществляется управление уровнем излучаемой мощности (УИМ) ПС. При этом с вероятностью P_5 сигналы УПС, КПС и дистанции передаются повторно. В случае дефицита бюджета мощности, с вероятностью $(1 - P_5)$ пользователь ПС А получает отказ от этой БС и начинает прием сигналов КВС от другой БС в течение некоторого времени t_{c2} с функцией распределения $C_2(t)$, и описанный процесс возобновляется. Процесс установления связи по каналу управления с пользователем ПС Б аналогичен описанному [72-75].

Если деструктивные условия отсутствуют, а вероятность этого события равна P_6 , то подлежащие передаче команды управления будут успешно доставлены адресату ТКФС за случайное время t_{b3} с функцией распределения $B_3(t)$, определяемое скоростью передачи R и объемом передаваемых данных V . В противном случае, с вероятностью $(1 - P_6)$ дестабилизирующие процессы нейтрализуются в течение случайного времени t_{d3} с функцией распределения $D_3(t)$, а команды передаются повторно. Команда на поддержание установленного соединения, имеющая случайную длительность t_3 с функцией распределения $C_3(t)$, передается в течении случайного интервала времени $t_{пк}$ с функцией распределения $F_{пк}(t)$ с вероятностью $P(t_3 > t_{пк})$. С обратной вероятностью $P(t_3 < t_{пк})$ команда на поддержание соединения передается повторно [72-75].

Требуется определить ФР $F_{грк}(t)$ времени передачи данных по беспроводному каналу связи ТКС ТКФС «РЖД» [72-75].

Решение.

Представим описанный в постановке задачи процесс передачи команд управления в виде укрупненной стохастической сети на рисунке 2.11.

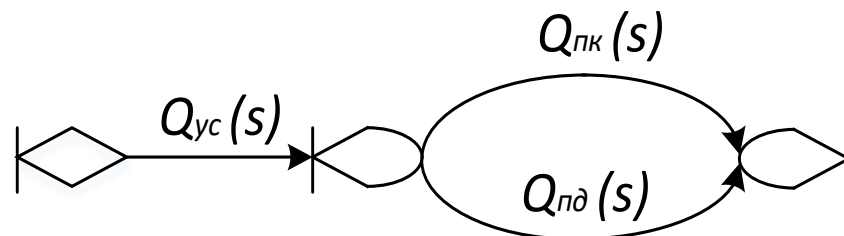


Рисунок 2.11 – Укрупненная стохастическая сеть процесса данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Для решения поставленной задачи необходимо определить ФР каждого частного процесса отдельно.

1. Определение функции распределения $F_{yc}(t)$ процесса установления соединения [75].

Представим процесс установления соединения в виде стохастической сети на рисунке 2.12.

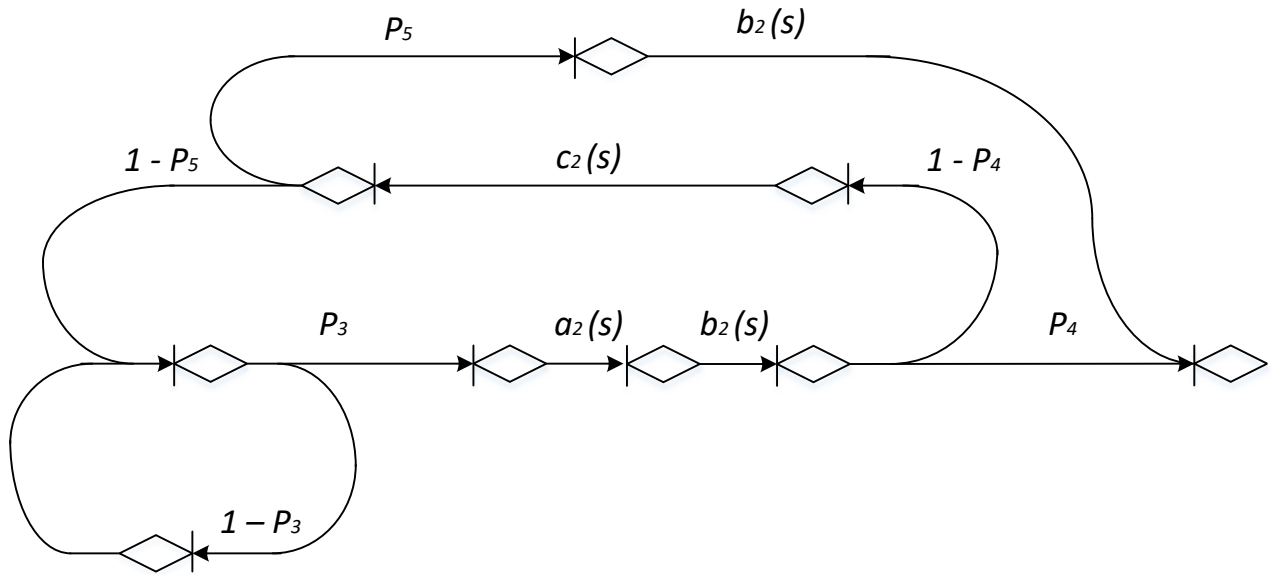


Рисунок 2.12 – Стохастическая сеть процесса установления соединения по логическому каналу

На рисунке обозначено:

- P_3 – вероятность приёма сигнала КВС;
- P_4 – вероятность приёма УПС, КПС и ДИСТАНЦИИ;
- P_5 – вероятность приёма БС сигналов УПС, КПС и ДИСТАНЦИИ после регулирования мощности;
- $a_2(s)$, $b_2(s)$ и $c_2(s)$ – ЛС ФР времени приема сигналов КВС, времени приема сигналов УПС, КПС, ДИСТАНЦИИ, времени регулирования мощности случайных величин, т.е.:

$$a_2(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[A_2(t)]; b_2(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[B_2(t)]; c_2(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[C_2(t)].$$

Используя уравнения топологического преобразования стохастических сетей, определим эквивалентную функцию стохастической сети:

$$Q_{yc}(s) = \frac{P_3 \frac{a_2(s)}{a_2(s) + s} \frac{c_2(s)}{c_2(s) + s} \left[P_4 + (1 - P_4) \frac{b_2(s)}{b_2(s) + s} P_5 \frac{c_2(s)}{c_2(s) + s} \right]}{1 - (1 - P_3) \frac{a_2(s)}{a_2(s) + s} - (1 - P_4) \frac{b_2(s)}{b_2(s) + s} (1 - P_5) P_3 \frac{a_2(s)}{a_2(s) + s} \frac{c_2(s)}{c_2(s) + s}}. \quad (2.6)$$

Полагая, что время передачи соответствующих команд, имеют экспоненциальное распределение, представим выражение (2.6) в виде суммы вычетов:

$$Q_{yc}(s) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(a_2 P_3 c_2) [(s_i^2)^2 A1 + s_i B1 + C1]]}{4(s_i)^3 + 3(s_i)^2 A2 + 2(s_i) B2 + C2} \cdot \left(\frac{1}{s - s_i} \right), \quad (2.7)$$

где

$$A1 = P_4;$$

$$A2 = 2c_2 + b_2 + a_2 P_3;$$

$$B1 = P_4 c_2 + P_4 b_2;$$

$$B2 = c_2^2 + 2c_2 b_2 + 2a_2 P_3 c_2 + a_2 P_3 b_2;$$

$$C1 = P_4 c_2 b_2 + P_5 c_2 b_2 - P_4 P_5 c_2 b_2;$$

$$C2 = c_2^2 b_2 + a_2 P_3 c_2^2 + a_2 P_3 c_2 b_2 + a_2 P_3 P_4 c_2 b_2 + a_2 P_3 P_5 c_2 b_2 - a_2 P_3 P_4 P_5 c_2 b_2;$$

$$D2 = a_2 P_3 P_4 c_2^2 b_2 + a_2 P_3 P_5 c_2^2 b_2 - a_2 P_3 P_4 P_5 c_2^2 b_2,$$

– коэффициенты разложения многочленов числителя и знаменателя эквивалентной функции (2.6).

Осуществляя переход в пространство оригиналов, получим функцию плотности:

$$f_{yc}(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(a_2 P_3 c_2) [(s_i)^2 A1 + s_i B1 + C1]]}{4(s_i)^3 + 3(s_i)^2 A2 + 2(s_i) B2 + C2} \cdot e^{s_i t}. \quad (2.8)$$

Интегрируя выражение (2.8), определим функцию распределения времени установления соединения между ПС и БС:

$$F_{yc}(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(a_2 P_3 c_2) [(s_i)^2 A1 + s_i B1 + C1]] (1 - \exp(-ts_i))}{[4(s_i)^3 + 3(s_i)^2 A2 + 2(s_i) B2 + C2](-s_i)}, \quad (2.9)$$

кроме того, с использованием (2.9) можно определить и среднее время установления соединения (2.10):

$$T_{yc} = \int_0^{\infty} t F_{yc}(t) dt = \sum_{i=0}^3 \frac{[(a_2 P_3 c_2) [(s_i)^2 A1 + s_i B1 + C1]]}{[4(s_i)^3 + 3(s_i)^2 A2 + 2(s_i) B2 + C2](-s_i)^2}. \quad (2.10)$$

Для дальнейших расчётов представим функцию распределения времени установления соединения в виде неполной гамма-функции (2.11):

$$F_{yc}(t) = \frac{\nu^s}{\Gamma(s)} \int_0^t t^{s-1} e^{-\nu t} dt, \quad (2.11)$$

Где

ν – параметр формы;

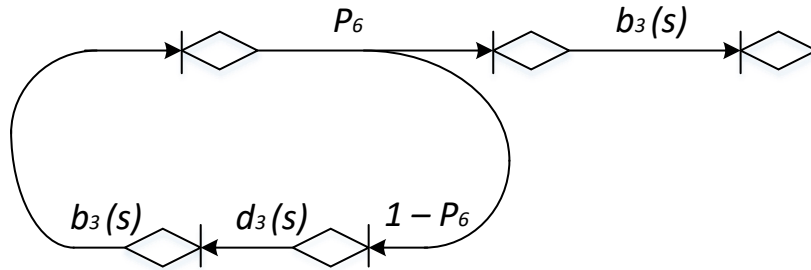
ς – параметр масштаба.

Изображением является (2.12):

$$Q_{yc}(s) = \left(\frac{\nu}{\nu+s} \right)^\varsigma. \quad (2.12)$$

2. Определение функции распределения $F_{нк}(t)$ времени реализации процесса передачи данных [72, 74].

Представим процесс передачи данных в виде стохастической сети на рисунке 2.13.



Рисунке 2.13 – Стохастическая сеть процесса передачи данных по физическому каналу

На рисунке обозначено:

– P_6 – вероятность реализации дестабилизирующих процессов;

– $b_3(s), d_3(s)$ – ПЛС ФР времени передачи пакета заданного объёма, времени восстановления, т. е.:

$$b_3(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[B_3(t)]; d_3(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[D_3(t)]. \quad (2.13)$$

Эквивалентная функция стохастической сети, представленной на рисунке 2.12 имеет вид (2.14):

$$Q_{нк}(s) = \frac{P_6 b_3(s)}{1 - ((1 - P_6) b_3(s) d_3(s))}. \quad (2.14)$$

Функция распределения времени передачи команд управления представляется в виде неполной гамма-функции (2.15):

$$F_{\text{пк}}(t) = \frac{\sigma^\rho}{\Gamma(\rho)} \int_0^t t^{\rho-1} e^{-\sigma t} dt, \quad (2.15)$$

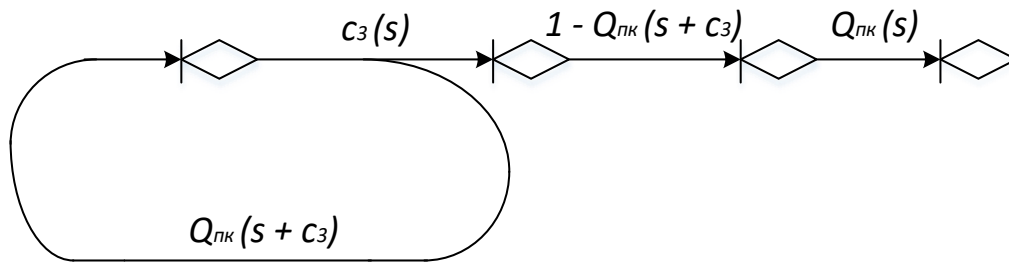
Где

σ – параметр формы;

ρ – параметр масштаба.

3. Определение функции распределения $F_{\text{но}}(t)$ времени реализации процесса поддержания установленного соединения на время передачи данных [72, 74].

Процесс поддержания установленного соединения на время передачи данных представляется в виде стохастической сети на рисунке 2.14.



Рисунке 2.14 – Стохастическая сеть процесса поддержания установленного соединения на время передачи данных по логическому каналу

На рисунке обозначено:

- $c_3(s)$ – ПЛС ФР длительности команды на поддержание соединения;
- $Q_{\text{пк}}(s + c_3)$ – ПЛС ФР времени повторного поддержания во время передачи;
- $Q_{\text{пк}}(s)$ – ПЛС ФР времени передачи команд управления;

$$c_3(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[C_3(t)]; \quad Q_{\text{пк}}(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[F_{\text{пк}}(t)]. \quad (2.16)$$

Эквивалентная функция стохастической сети, представленной на рисунке 2.13 имеет вид (2.17):

$$Q_{\text{пд}}(s) = \frac{c_3(s)(1 - Q_{\text{пк}}(s + c_3))Q_{\text{пк}}}{1 - [c_3(s)(Q_{\text{пк}}(s + c_3))]} \quad (2.17)$$

Функция распределения времени реализации процесса поддержания установленного соединения на время передачи данных представляется в виде неполной гамма-функции (2.18):

$$F_{\text{пд}}(t) = \frac{\theta^\zeta}{\Gamma(\zeta)} \int_0^t t^{\zeta-1} e^{-\theta t} dt, \quad (2.18)$$

Где

θ – параметр формы;

ζ – параметр масштаба.

Результаты, полученные в пунктах 1–3, позволяют определить эквивалентную функцию стохастической сети, представленной на рисунке 2.10 (2.19):

$$Q_{\text{рк}}(s) = Q_{\text{yc}}(s) L\{F_{\text{рк}}(t) F_{\text{пд}}(t)\}, \quad (2.19)$$

где $L\{F_{\text{рк}}(t) F_{\text{пд}}(t)\}$ – оператор преобразования Лапласа произведения двух функций распределения [76].

Для определения преобразования Лапласа правого сомножителя в формуле (2.19), используя формулы (2.15) и (2.18), предлагается следующий подход.

Пусть задана функция распределения (2.20):

$$F(t) = \frac{\sigma^\rho \theta^\zeta}{\Gamma(\rho) \Gamma(\zeta)} \int_0^t t^{\rho-1} e^{-\sigma t} dt \int_0^t t^{\zeta-1} e^{-\theta t} dt, \quad (2.20)$$

с функцией плотности (2.21):

$$f(t) = \frac{\sigma^\rho \theta^\zeta}{\Gamma(\rho) \Gamma(\zeta)} (g(t) G_1(t) + g_1(t) G(t)), \quad (2.21)$$

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

$$G(t) = \int_0^t t^{\rho-1} e^{-\sigma t} dt, \quad G_1(t) = \int_0^t t^{\zeta-1} e^{-\theta t} dt.$$

Определим изображения производных и их первообразных:

$$L(g, s) = \int_0^t t^{\rho-1} e^{-\sigma t} e^{-st} dt = \frac{1}{(s + \sigma)^\rho} \int_0^\infty u^{\rho-1} e^{-u} du = \frac{\Gamma(\rho)}{(s + \sigma)^\rho}; \quad (2.22)$$

$$L(g_1, s) = \int_0^t t^{\zeta-1} e^{-\theta t} e^{-st} dt = \frac{1}{(s + \theta)^\zeta} \int_0^\infty u^{\zeta-1} e^{-u} du = \frac{\Gamma(\zeta)}{(s + \theta)^\zeta}; \quad (2.23)$$

$$L(G, s) = \frac{1}{s} L(g, s) = \frac{\Gamma(\rho)}{s(s+\sigma)^\rho} = \frac{\Gamma(\rho)}{(s+\sigma)^{\rho+1}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\sigma}{s+\sigma} \right)^k = \Gamma(\rho) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sigma^k}{(s+\sigma)^{\rho+k+1}}; \quad (2.24)$$

$$L(G_1, s) = \frac{1}{s} L(g_1, s) = \frac{\Gamma(\zeta)}{s(s+\theta)^\zeta} = \frac{\Gamma(\zeta)}{(s+\theta)^{\zeta+1}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\theta}{s+\theta} \right)^k = \Gamma(\zeta) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\theta^k}{(s+\theta)^{\zeta+k+1}}. \quad (2.25)$$

Подставляя (2.22 – 2.25) в (2.21), получим изображение функции плотности:

$$HA(s, N) = [HA_1(s, N) + HA_2(s, N)] \frac{(\sigma^\rho \theta^\zeta)}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]}, \quad (2.26)$$

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;

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

Осуществляя почленный переход в пространство оригиналов, интегрируя полученный результат с переменным верхним пределом, получим функцию распределения времени совместной реализации процессов передачи данных и поддержания установленного соединения (2.27):

$$HF(t, N) = [HF_1(t, N) + HF_2(t, N)] \frac{(\sigma^\rho \theta^\zeta)}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]}, \quad (2.27)$$

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 $(\rho + \zeta + k)$.

Подставляя (2.27) в (2.20), получим эквивалентную функцию стохастической сети, представленной на рисунке 2.11 (2.28):

$$QA_{pk}(s, N) = \left(\frac{v}{v+s}\right)^\zeta [HA_1(s, N) + HA_2(s, N)] \frac{(\sigma^\rho \theta^\zeta)}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]} = \tag{2.28}$$

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

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

где $\lambda_k = \frac{T_k}{D_k}$; $\alpha_k = \frac{T_k^2}{D_k}$ k -е параметры масштаба и формы;

$$T_k = \frac{\rho + \zeta + k}{\sigma + \theta} + M_{1yc}; D_k = \frac{\rho + \zeta + k}{(\sigma + \theta)^2} + D_{yc}.$$

Осуществляя 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 ОАО «РЖД» (2.29):

$$QF_{pk}(t, N) = \frac{(\sigma^\rho \theta^\zeta)}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]} \left\{ \Gamma(\rho + \zeta) \sum_{k=0}^N \left[\frac{\sigma^k \gamma(\lambda_k t, \alpha_k)}{(\sigma + \theta)^{(\rho + \zeta + k)}} \frac{f(\rho + \zeta + k - 1, k)}{f(\rho + k, k + 1)} \right] + \right. \tag{2.29}$$

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

Получим среднее время процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД» (2.30):

$$T_{pk}(N) = \frac{(\sigma^\rho \theta^\zeta)}{[\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)]} \left\{ \Gamma(\rho + \zeta) \sum_{k=0}^N \left[\frac{\sigma^k T_k}{(\sigma + \theta)^{(\rho + \zeta + k)}} \frac{f(\rho + \zeta + k - 1, k)}{f(\rho + k, k + 1)} \right] + \right. \tag{2.30}$$

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

По полученным соотношениям проведены расчёты при следующих исходных данных [28, 31, 44, 45, 61, 62]:

- длительность приема КВС (51 – кадрового мультикадра): $\overline{t_{a2}} = 0,235$ с;
- время приема БС значений параметров: $\overline{t_{b2}} = 1,5$ с;
- длительность управления уровнем излучаемой мощности БС: $\overline{t_{c2}} = 0,2$ с;

- значение вероятностей: $P_3 = P_4 = P_5 = 0,95$.
- время передачи пакета $\overline{t_{b3}} = 0,95$ с;
- время восстановления $\overline{t_{d3}} = 1$ с;
- вероятность реализации дестабилизирующих процессов $P_6 = 0,01$;
- время поддержания соединения $\overline{t_{c3}} = 0,1$ с.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы [72-75]:

- из рисунка 2.15 следует, что в случае наличия доступности и реализации дестабилизирующих факторов на процесс передачи данных, вероятность успешной доставки данных за заданное время значительно ухудшается. Расчёты показывают, что время успешной доставки данных увеличивается в 4 и более раз при снижении реальной пропускной способности маршрута передачи. Так, например, при увеличении вероятности реализации дестабилизирующих процессов от $P_6 = 0,01$ до $P_6 = 0,9$, среднее время доставки данных увеличивается с $\overline{T_{рк}} = 5,5$ с до $\overline{T_{рк}} = 40$ с;

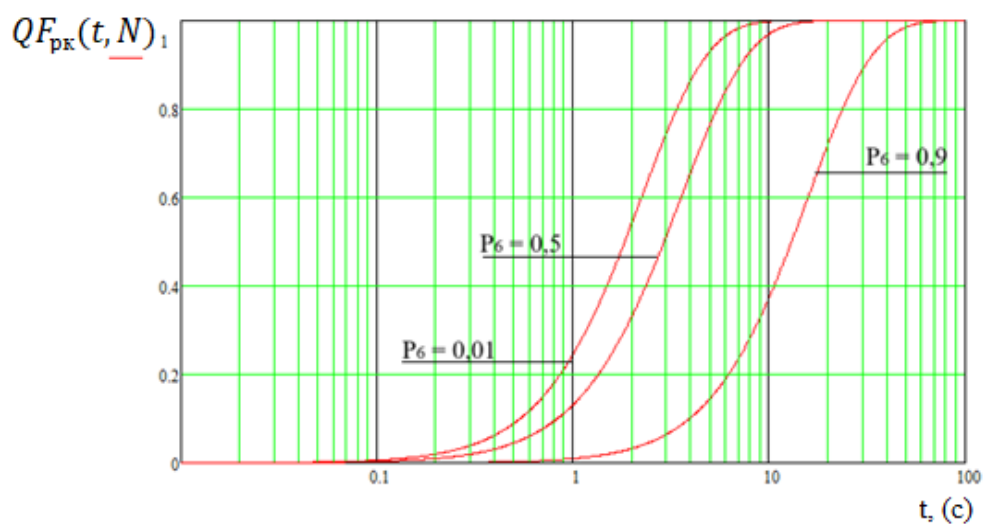


Рисунок 2.15 – Семейство функций распределения времени передачи данных при различных значениях вероятности реализации дестабилизирующих процессов

- в дестабилизирующих условиях на время успешной доставки команд управления оказывает существенное влияние оперативность обнаружения и восстановления работоспособности канала передачи. На рисунке 2.16

представлено семейство функций распределения времени успешной доставки сигналов при различных значениях среднего времени $\overline{t_{d3}}$ нейтрализации неблагоприятных условий. Так, например, при сокращении времени обнаружения и нейтрализации $\overline{t_{d3}}$ до одной секунды, время доставки команд сократится более, чем в три раза. Это указывает на целесообразность и перспективность разработки методов раннего обнаружения, например, методами [4];

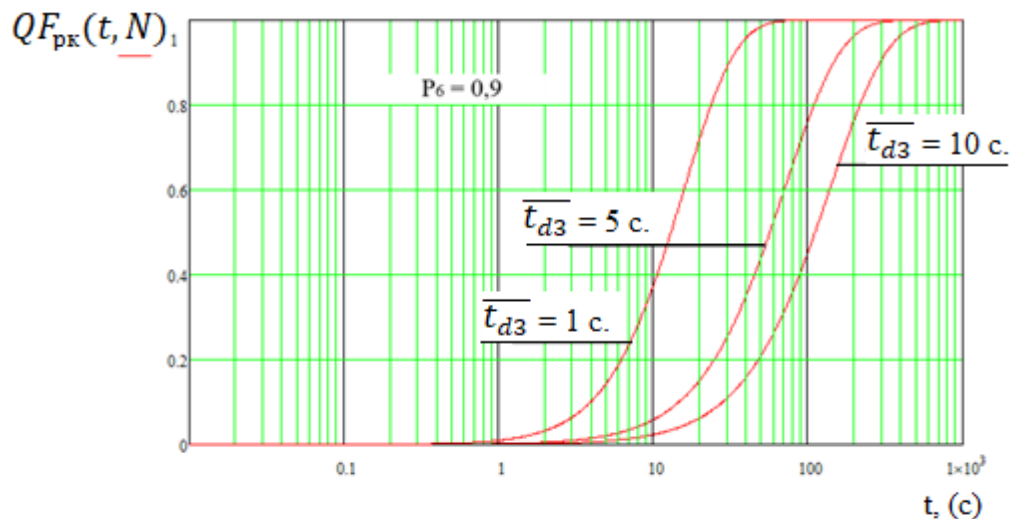


Рисунок 2.16 – Семейство функций распределения времени передачи команд управления при различных значениях времени восстановления

– предложен подход к определению эквивалентной функции фрагмента стохастической сети, содержащего логический узел «Включающее И». Подход предусматривает разложение частных изображений функций плотности (2.21) в ряд (2.26) с последующим определением функции распределения (2.27). Результаты вычислений на рисунке 2.17 показывают, что значения, полученные по формуле (2.27), полностью совпадают с исходной функцией распределения (2.20);

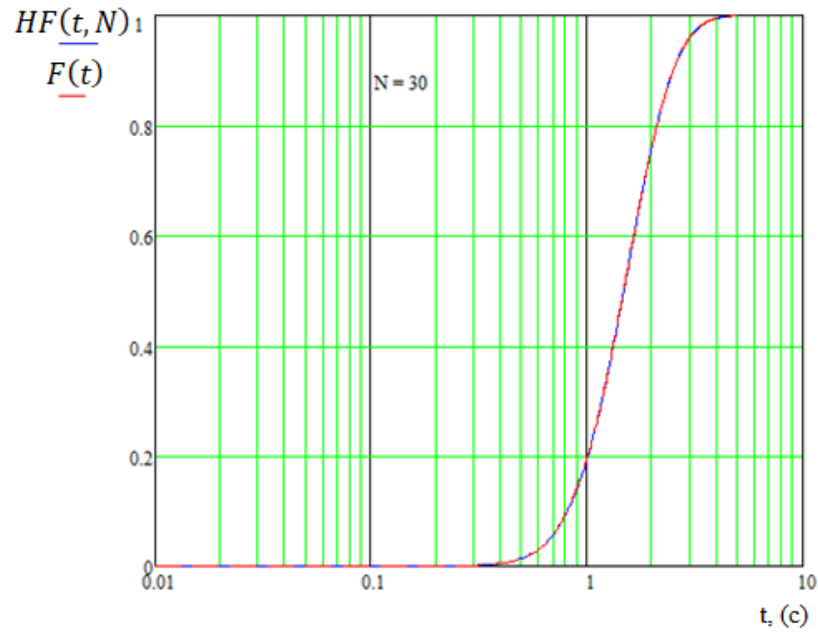


Рисунок 2.17 – Графики функции распределения времени реализации логического узла «Включающее И», полученные по формулам (2.20) и (2.27)

– зависимость абсолютной погрешности вычисления значений функции (2.20) с использованием (2.27) при различном числе членов ряда N представлена на рисунке 2.18. Результаты вычислений показывают, что при увеличении числа членов ряда погрешность быстро уменьшается и при числе членов ряда более 30 становится пренебрежимо малой;

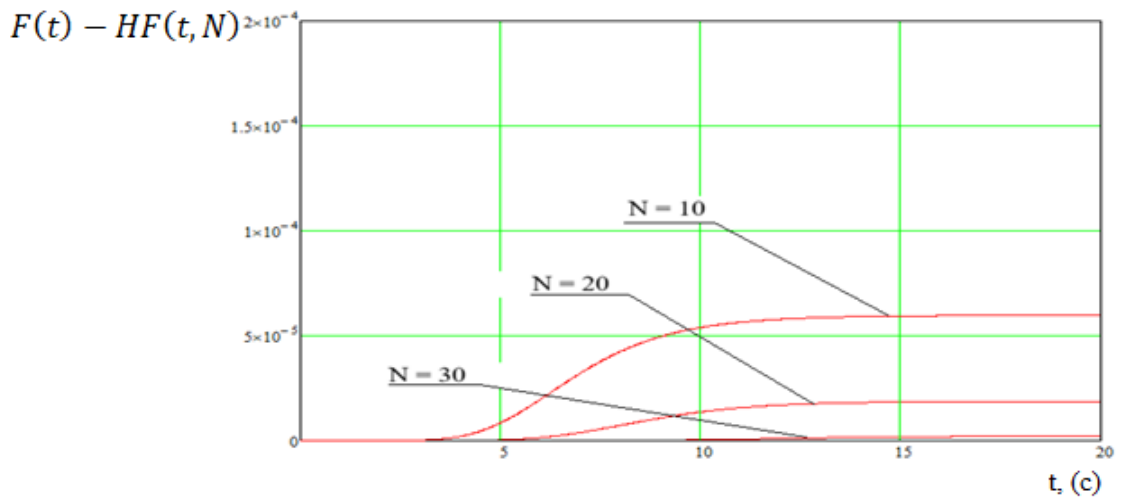


Рисунок 2.18 – График зависимости абсолютной погрешности определения функции распределения $F(t)$ с использованием ряда $HF(t, N)$

– учитывая, что выражение ЭФ (2.28) довольно сложное, упростим его путём аппроксимации неполной гамма-функцией. Следовательно, ФР времени реализации процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД» представляется в виде неполной гамма-функции (2.31):

$$F_{\text{рк}}(t) = \frac{\alpha_{\text{рк}}^{\mu_{\text{рк}}}}{\Gamma(\mu_{\text{рк}})} \int_0^t t^{\mu_{\text{рк}}-1} e^{-\alpha_{\text{рк}} t} dt \quad (2.31)$$

Где

$\alpha_{\text{рк}}$ – параметр формы;

$\mu_{\text{рк}}$ – параметр масштаба;

– результаты оценки абсолютной погрешности представления искомой ФР в виде неполной гамма-функции (2.31) демонстрируются на рисунке 2.19. Проведённый анализ показывает, что максимальная абсолютная погрешность расчётов в этом случае не превысит 9×10^{-3} , что вполне удовлетворительно для проведения инженерных расчётов. Следует отметить, что использование экспоненциального распределения даёт наибольший разброс погрешности по сравнению с детерминированными или гамма-распределениями. Однако его использование обосновано с точки зрения обеспечения безопасности. Экспоненциальное распределение описывает ситуацию, при которой дестабилизирующие факторы будут реализованы. Это позволяет учесть этот фактор при разработке механизмов защиты;

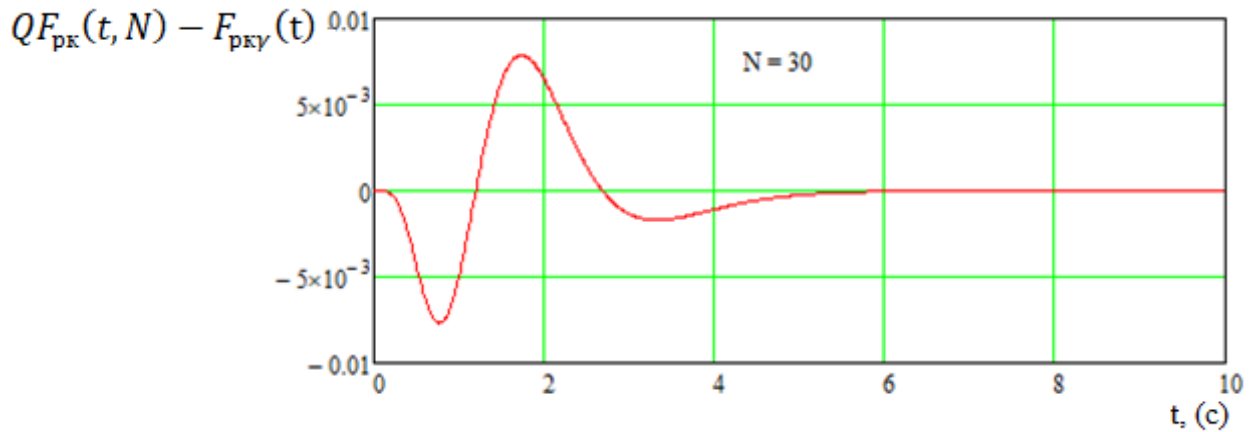


Рисунок 2.19 – Зависимость абсолютной погрешности аппроксимации функции распределения неполной гамма-функцией

Таким образом разработанная частная математическая модель процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД», в которой процесс передачи данных по беспроводным каналам связи включает в себя подпроцессы: установления соединения, передачи данных и поддержания установленного соединения на время передачи данных. Особенностью данной модели является учёт не только энергетических параметров беспроводного канала связи, но и его стойкость к дестабилизирующим процессам. В ходе разработки модели была определена эквивалентная функция фрагмента стохастической сети, содержащего логический узел «Включающее И». Показано, что функция распределения времени реализации узла «Включающее И» может быть аппроксимирована неполной гамма-функцией, что существенно упрощает вид эквивалентной функции и позволит несколько снизить вычислительную сложность задачи оценки качества функционирования беспроводных каналов связи без существенного ущерба точности получаемых результатов [77].

Наличие разработанных частных математических моделей канальной части и информационного дестабилизирующего процесса, позволяет разработать частную математическую модель функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов.

2.5 Частная модель процесса функционирования узла коммутации в условиях дестабилизирующих факторов

Из архитектуры ТКС ТКФС ОАО «РЖД» следует, что ТКС состоит из узлов коммутации (УК) и каналов связи, соединяющих их. Процесс обслуживания передаваемых данных в УК с учётом внешних условий был описан в работе [78]. Но не учитывалась возможность по реализации физического дестабилизирующего фактора на оборудование УК, которое может привести к техническому отказу. Кроме того, не учитывался дестабилизирующий процесс по снижению вычислительной способности УК. Разработанная частная модель отличается тем, что учитывает одновременную реализацию процессов реализации информационных и физических дестабилизирующих факторов на процесс функционирования УК. Модель позволяет провести согласованную, совместную оценку влияния дестабилизирующих факторов на УК.

Постановка задачи.

Каждый узел коммутации содержит канал передачи данных с пропускной способностью R (бит/с), буферы памяти объёмом $0 < K < \infty$ и блок управления, кроме того УК функционирует в условиях одновременной реализации информационного дестабилизирующего фактора «Отказ в обслуживании», физического дестабилизирующего фактора и снижения вычислительной способности УК. УК имеет несколько входов, суммарный поток данных, имеющий интенсивность $\lambda_{\text{вх}}$, распределяется между всеми входами в зависимости от нагрузки, то есть $\lambda_i, i = 1, N$, с вероятностью $P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\text{вх}}}, i = 1, N$.

После поступления пакета данных на один из входов в течение случайного времени t_{a4} с функцией распределения $A_4(t)$, в случае если канал передачи не занят обслуживанием ранее поступивших данных и буфер памяти не заполнен, то с вероятностью $P_{\text{об}}$ пакет данных будет успешно обслужен и поступит на передачу. Пакет будет успешно передан за случайное время t_{b4} с функцией распределения $B_4(t)$ с учётом вероятности коэффициента готовности K_r и с учётом вероятности

снижения вычислительной способности УК ($1 - K_{\text{ка}}$). С обратной вероятностью ($1 - P_{\text{об}}$), пакет данных получит отказ в обслуживании и через некоторое время t_{c4} с функцией распределения $C_4(t)$ вновь поступит на i -й вход узла коммутации [78].

Поскольку узел коммутации функционирует в условиях дестабилизирующих факторах, предполагается, что он доступен для внешнего источника. С вероятностью $P_{\text{оо}}$ процесс «Отказ в обслуживании» успешно реализуется, генерируя на вход узла коммутации дополнительный поток пакетов с суммарной интенсивностью $\lambda_{\text{оо}}$. Этот поток накладывается на легитимный трафик и распределяется по всем интерфейсам узла, что приводит к переполнению буферов и, как следствие, к потере передаваемых данных.

Физические причины приводят к техническому отказу оборудования. С вероятностью $(1 - K_r)$, функционирование УК восстанавливается за некоторое время t_{d4} с ФР D_4 . При снижении вычислительной способности УК с вероятностью $K_{\text{ка}}$ осуществляется нейтрализация за случайное время t_{e4} с ФР $E_4(t)$ и после данные передаются повторно.

Требуется определить ФР $F_{\text{ук}}(t)$ времени обслуживания данных УК ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов [79].

При моделировании вводятся следующие ограничения и допущения:

- топология сети ТКС ТКФС ОАО «РЖД» известна;
- проведён сбор данных, реализовано подключение к целевому УК и сформирована бот-сеть;
- внешний источник имеет физический доступ к УК.

Решение.

Описанный в постановке задачи процесс представлен на рисунке 2.20 в виде стохастической сети.

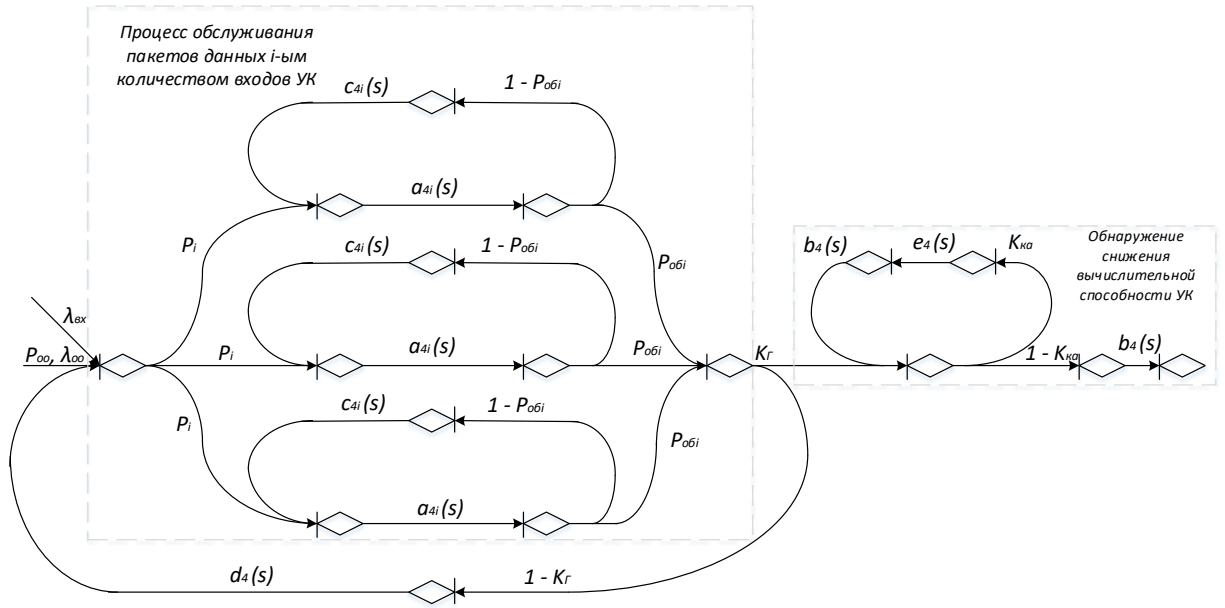


Рисунок 2.20 – Стохастическая сеть процесса функционирования УК ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

На рисунке обозначено:

- $\lambda_{\text{вх}}$ – суммарный поток пакетов поступающих на входы УК;
- λ_{00} – суммарный поток пакетов от системы внешнего источника;
- P_{00} – вероятность реализации информационного дестабилизирующего процесса;
- P_i – вероятность поступления пакетов на один из входов УК;
- $P_{\text{оби}}$ – вероятность успешного обслуживания пакетов входами УК;
- K_{Γ} – коэффициент готовности УК;
- $K_{\text{ка}}$ – вероятность снижения вычислительной способности УК;
- $a_{4i}(s)$, $b_4(s)$, $c_{4i}(s)$, $d_4(s)$, $e_4(s)$ – ПЛС ФР длительности поступления пакетов данных на один из входов, времени передачи обслуженного пакета данных, времени поступления пакета данных после отказа в обслуживании, времени восстановления УК после технического отказа, времени нейтрализации снижения вычислительной способности.

Для УК эквивалентная функция, функция распределения были получены в работе [78]. Так как УК имеет ограниченную техническую надёжность, необходимо учитывать коэффициент готовности узла коммутации K_{Γ} ,

рассчитываемый на основании теории надёжности и вероятность снижения вычислительной способности УК $K_{\text{ка}}$.

Вероятность поступления потока данных на каждый из входов определяется с учётом интенсивности потока данных на каждый из входов, вероятности дестабилизирующего процесса и суммарной интенсивности на входе (2.32):

$$P_i = \frac{\lambda_i + \frac{\lambda_{00} P_{00}}{n}}{\lambda_{\text{вх}} + \lambda_{00} P_{00}}, \quad (2.32)$$

где

n – число входов в УК;

λ_i – интенсивность потока данных на i -ый вход УК.

Определим эквивалентную функцию для i -го канала обслуживания в УК (2.33):

$$Q_{\text{вх}i}(s) = \frac{P_i a_{4i}(s) P_{06i}}{1 - a_{4i}(s)(1 - P_{06i})c_{4i}(s)} \approx \left(\frac{\alpha_{\text{вх}i}}{\alpha_{\text{вх}i} + s} \right)^{\mu_{\text{вх}i}}. \quad (2.33)$$

Эквивалентная функция правой части стохастической сети, процесса нейтрализации снижения вычислительной способности (2.34):

$$Q_{\text{ка}}(s) = \frac{(1 - K_{\text{ка}})b_4(s)}{1 - (K_{\text{ка}}b_4(s)e_4(s))} \approx \left(\frac{\alpha_{\text{ка}}}{\alpha_{\text{ка}} + s} \right)^{\mu_{\text{ка}}}. \quad (2.34)$$

Эквивалентная функция стохастической сети узла коммутации имеет вид (2.35):

$$Q_{\text{ук}}(s) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_{\text{вх}i}}{\alpha_{\text{вх}i} + s} \right)^{\mu_{\text{вх}i}} \right) K_{\Gamma} \left(\frac{\alpha_{\text{ка}}}{\alpha_{\text{ка}} + s} \right)^{\mu_{\text{ка}}}}{1 - (1 - K_{\Gamma})d_4(s)}. \quad (2.35)$$

Определение функции распределения в виде неполной гамма-функции, осуществляется аналогично пункту 2.2 диссертации.

Тогда, функция распределения времени реализации процесса обслуживания данных УК примет вид:

$$F_{\text{ук}}(t) = \frac{\alpha_{\text{ук}}^{\mu_{\text{ук}}}}{\Gamma(\mu_{\text{ук}})} \int_0^t t^{\mu_{\text{ук}}-1} e^{-\alpha_{\text{ук}} t} dt, \quad (2.36)$$

Где

$\alpha_{ук}$ – параметр формы;

$\mu_{ук}$ – параметр масштаба.

Таким образом, поставленная задача решена.

Результаты расчёта по (2.36) представлены в виде графиков на рисунках 2.21 – 2.25.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы [78,79]:

– время обслуживания пакета данных УК определяется исключительно его объёмом и пропускной способностью канала передачи. На рисунке 2.21 представлены предельные функции распределения времени передачи для двух случаев: при фиксированном и при переменном объёме пакета. Анализ показывает, что обслуживание пакетов данных с фиксированным объёмом осуществляется за меньшее время по сравнению со сценарием с переменным объёмом, где возможны значительные временные флуктуации. В контексте ТКС ТКФС ОАО «РЖД», такие характеристики критически важны. Команды управления должны доставляться с гарантированной задержкой и минимальным джиттером;

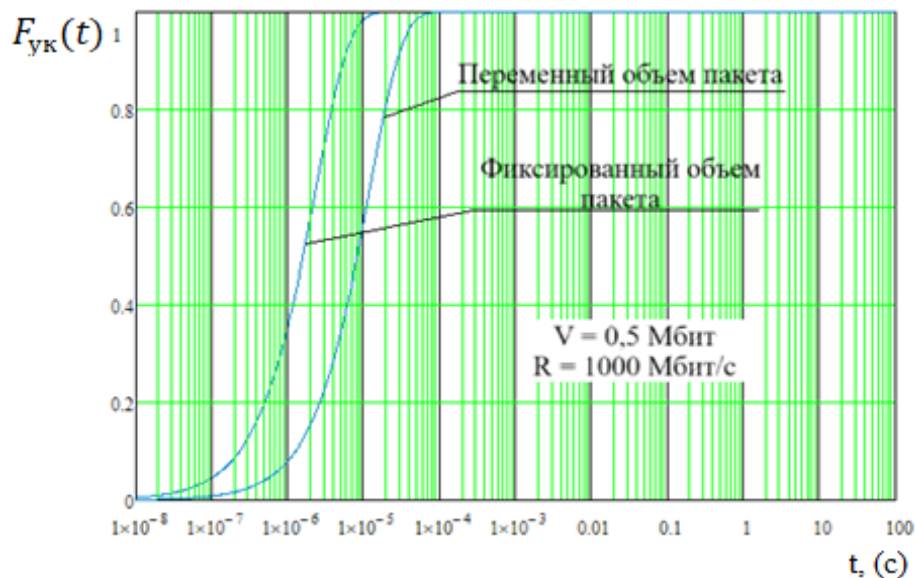


Рисунок 2.21 – Функции распределения времени обслуживания пакетов данных при различном объёме пакетов

– при увеличении интенсивности трафика возрастает влияние модели трафика на характеристики качества обслуживания (рисунок 2.22). Среди рассмотренных моделей потоков данных наименьшее среднее время задержки пакетов демонстрирует пуассоновский поток, что обусловлено низкой вариативностью межпакетных интервалов. В то же время, при использовании самоподобных потоков — в частности, моделируемых распределениями Вейбулла и Парето — наблюдается значительный рост времени задержки, который усиливается с увеличением индекса Хёрста. Это связано с тем, что пакеты поступают не равномерно, а «пачками», что приводит к временным перегрузкам УК. Кроме того, в условиях самоподобного трафика значительно возрастает вероятность потери пакетов, поскольку буферные накопители узлов быстро исчерпывают свою ёмкость при всплесках нагрузки;

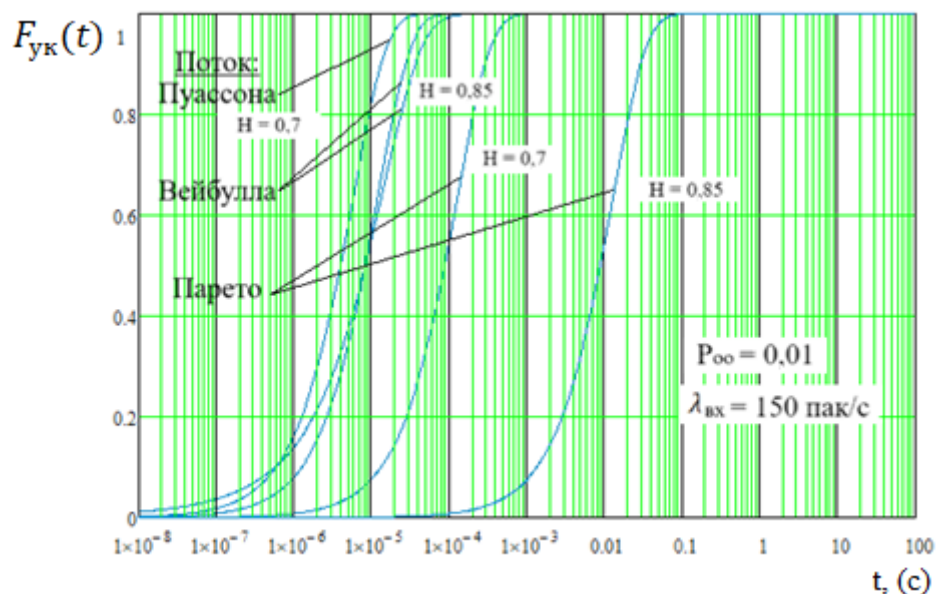


Рисунок 2.22 – Функции распределения времени задержки обслуживания пакетов данных при различных видах потока данных

– при успешной реализации дестабилизирующих факторов на УК наблюдается значительное увеличение времени обслуживания пакетов данных (рисунки 2.23, 2.24). Расчёты показывают, что в этих условиях задержка передачи может возрастать в несколько раз, что приводит к резкому снижению как оперативности, так и достоверности передаваемой информации. Это делает

невозможным корректное обслуживание легитимного трафика реального времени — в частности, команд управления объектами ТКФС. Полученные результаты подчёркивают критическую необходимость внедрения мер оперативного мониторинга и прогнозирования состояния сетевых элементов, направленных на ограничение возможностей по инициации и масштабированию дестабилизирующих процессов;

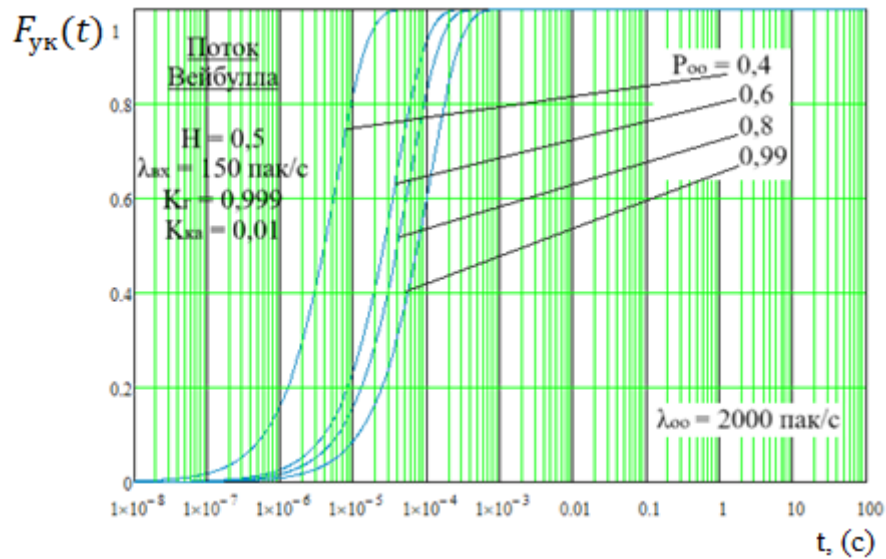


Рисунок 2.23 – Функции распределения времени задержки обслуживания пакетов данных в условиях дестабилизирующих факторов

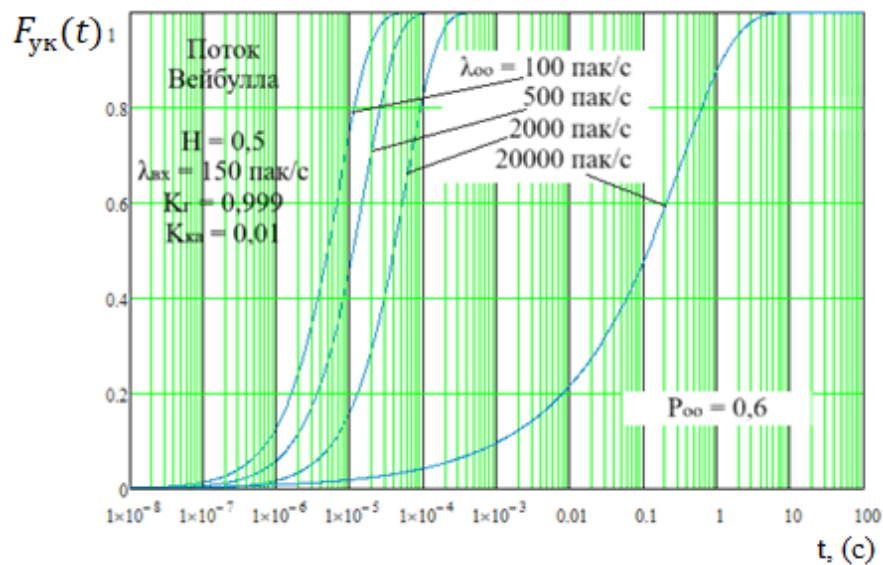


Рисунок 2.24 – Функции распределения времени задержки обслуживания пакетов данных с учётом различной интенсивности процесса дестабилизации

– ввиду доступности УК для физического фактора (рисунок 2.25), коэффициент готовности значительно снижается. Это напрямую приводит к кратному увеличению времени обслуживания пакетов данных, что нарушает требования по своевременности передачи управляющих команд. Для обеспечения требуемого уровня качества процесса функционирования УК, необходимо реализовать два направления защиты: физическое ограничение доступа к узлу коммутации и сокращение времени восстановления УК после инцидента. Необходима разработка и применение системы мониторинга сетевых элементов, которая позволит своевременно выявлять признаки дестабилизирующих процессов.

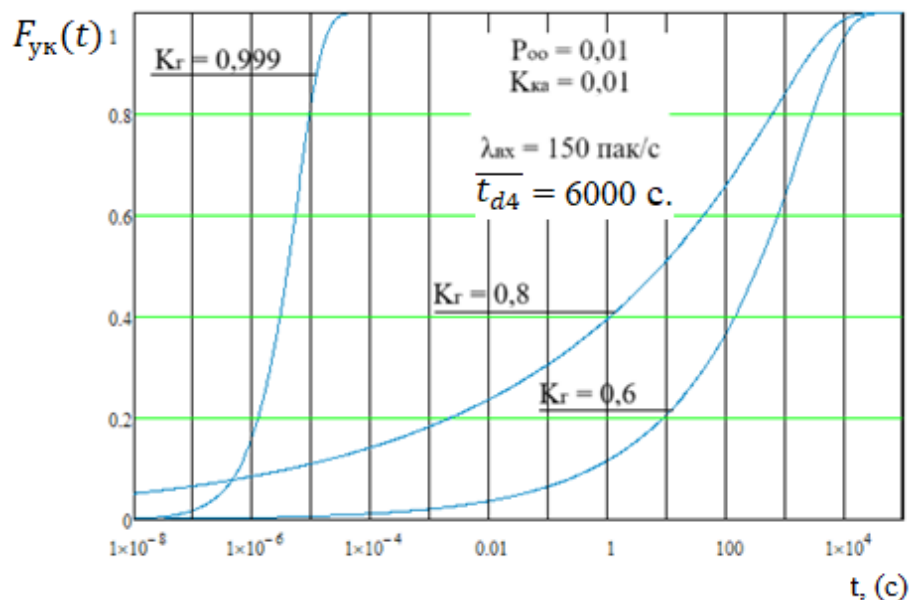


Рисунок 2.25 – Функции распределения времени задержки обслуживания пакетов данных в условиях физического дестабилизирующего фактора

Разработка частных математических моделей канальной части и УК, позволила разработать частную математическую модель процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

2.6 Частная модель процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Основной определяющей характеристикой ТКФС является использование крупномасштабных ТКС, имеющих гетерогенную среду передачи данных. С этой целью актуализировалась разработка частной математической модели процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

В работе [80] предложена модель доставки пакетов в условиях компьютерных воздействий с учётом параметров модели поведения источника. Однако в расчётах не учитывается интенсивность поступающего трафика и её влияние на задержку доставки, а также специфика протоколов передачи данных, что снижает применимость модели к реальным ТКС ТКФС. В исследовании [81] анализируется зависимость времени доставки пакетов от интенсивности их отправки, при этом ключевым параметром является вариация задержки в узле передачи. Вместе с тем, влияние дестабилизирующих факторов — способных кардинально изменить характеристики канала — не учитывается, что ограничивает использование подхода для оценки качества функционирования ТКС в условиях сторонних процессов.

В пункте представляется разработанная частная математическая модель процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД». При этом работы [78, 80, 81] используются для расчёта отдельных показателей.

Постановка задачи.

Узлы коммутации, принадлежащие данной топологии фрагмента ТКС ТКФС, представленной на рисунке 2.26, принимают и передают потоки данных другим узлам коммутации, которые относятся к другим участкам ТКС ($R_k - R_j$). Фрагмент ТКС состоит из: центра управления движением поездов, IP-сети, содержащей шесть узлов коммутации (УК) ($R1 - R6$), соединённых друг с другом каналами связи протокола ТСП и трех базовых станций (БС) ($U1 - U3$). Передача данных от

БС объектам управления ТКФС обеспечивается по беспроводным каналам связи [79, 82].

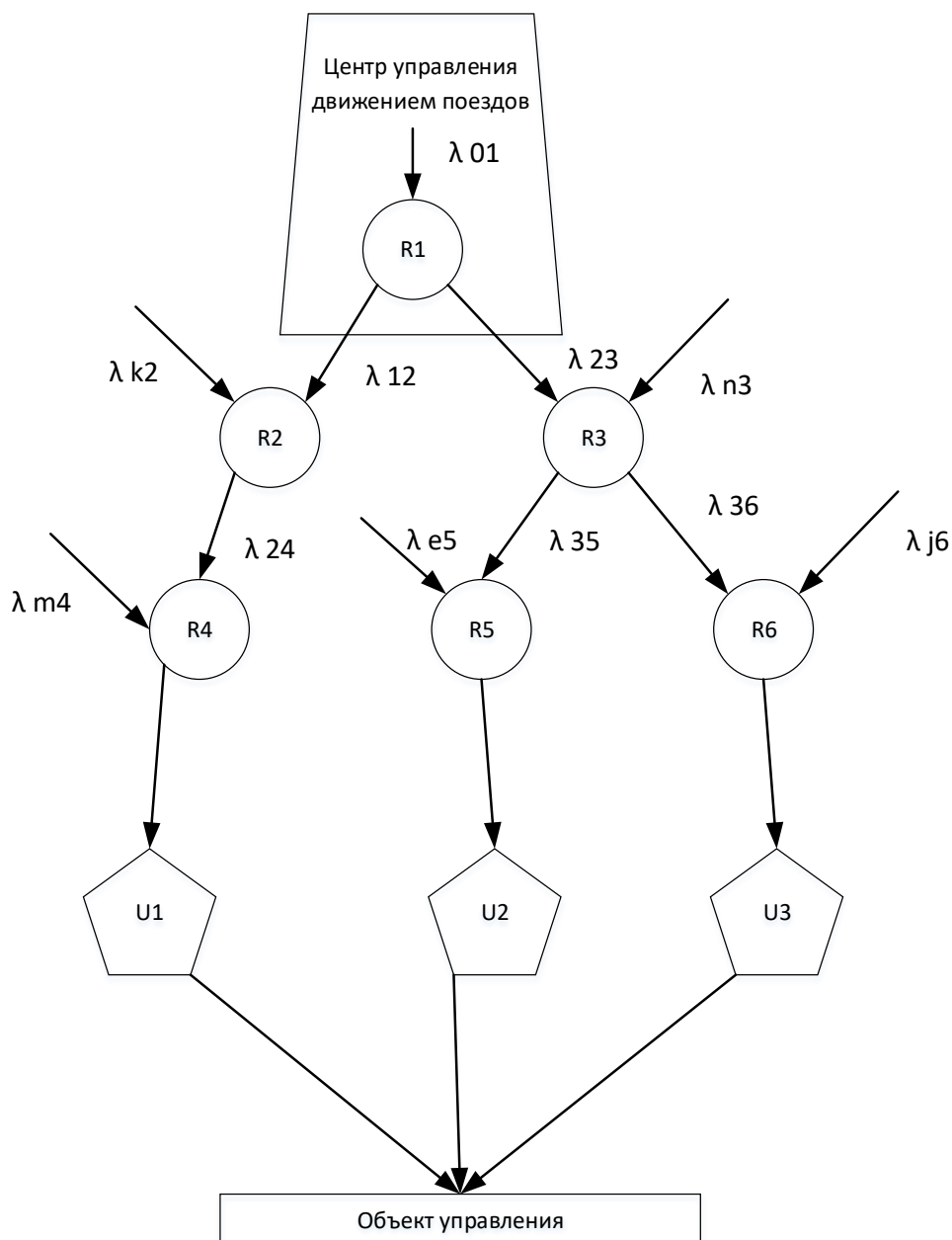


Рисунок 2.26 – Топология фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Положим, что оборудование, входящее в состав узлов коммутации ($R1 - R6$) и базовых станций ($U1 - U3$) технически исправно на момент начала функционирования. Центр управления движением поездов, формирует команды для передачи по ТКС. Данные поступают на узел коммутации $R1$ и за некоторое время $t_{ук1}$ с функцией распределения $Q_{ук1}(t)$, информация поступит на передачу. Она осуществляется за некоторое время $t_{кан}$ с функцией распределения $F_{кан}(t)$. В

зависимости от местоположения объекта управления с вероятностью P_7 команды поступят на УК $R2$, с обратной вероятностью $(1 - P_7)$ на УК $R3$. При отправке через узел коммутации $R2$ данные поступят за время $t_{ук2}$ с функцией распределения $Q_{ук2}(t)$. Далее, в соответствии со структурой ТКС ТКФС, информация будет доставлена на узел $R4$ за время $t_{кан}$ с функцией распределения $F_{кан}(t)$, обслужена за $t_{ук4}$ с распределением $Q_{ук4}(t)$ и направлена на базовую станцию $U1$ за $t_{кан}$ с функцией распределения $F_{кан}(t)$. При маршрутизации через узел $R3$ данные обслуживаются за $t_{ук3}$ с распределением $Q_{ук3}(t)$ и передаются по каналу связи за $t_{кан}$ с функцией распределения $F_{кан}(t)$. В зависимости от местоположения объекта управления с вероятностью P_8 информация поступит на узел $R5$, где будет обслужена за $t_{ук5}$ с распределением $Q_{ук5}(t)$ и направлена на базовую станцию $U2$ за время $t_{кан}$ с функцией распределения $F_{кан}(t)$. В противном случае, с вероятностью $(1 - P_8)$, данные достигнут узла $R6$ и через него будут направлены к базовой станции $U3$ после обслуживания за $t_{ук6}$ с распределением $Q_{ук6}(t)$ и прохождения канала связи за $t_{кан}$ с функцией распределения $F_{кан}(t)$ [79].

При перемещении объекта управления между зонами базовых станций ($U1 - U3$), разнесенных в соответствии с частотно-территориальным планом, обмен осуществляется следующим образом: от БС $U1 - U3$ за время $t_{рк}$ с функцией распределения $F_{ркγ}(t)$. Указанные функции распределения описаны в предыдущих пунктах.

Блок-схема этапов процесса передачи данных по проводным каналам между УК представлена на рисунке 2.27.



Рисунок 2.27. Блок-схема этапов процесса передачи данных по проводным каналам связи

Требуется определить функцию распределения $F_{ткс}(t)$ времени передачи данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

При моделировании вводятся следующие ограничения и допущения:

– частные процессы описываются гамма-распределением;

- вероятность успешной реализации информационного дестабилизирующего фактора и интенсивность успешных попыток определяются с использованием моделей [78-80] и полагаются равными для УК R1: $P_{00} = 0,7$, $\lambda_{00} = 20000(\text{пак/с})$;
- коэффициент готовности для УК R3 полагается равным: $K_{г.R3} = 0,7$;
- проводные каналы связи используют протокол TCP, а для беспроводных каналов связи применяется стандарт подвижной радиосвязи LTE-R, следовательно, полученные результаты могут использоваться только для цифровых сетей передачи данных.

Решение.

Представим описанный в постановке задачи процесс передачи данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в виде укрупнённой стохастической сети на рисунке 2.28.

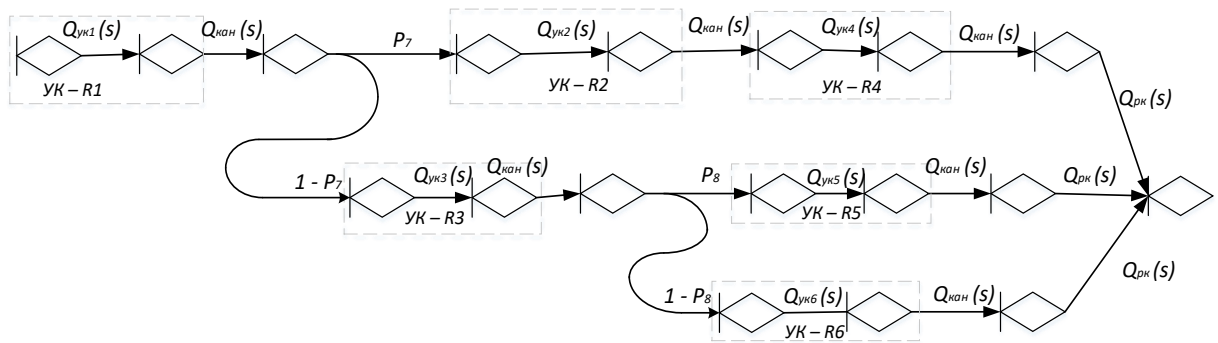


Рисунок 2.28 – Укрупнённая стохастическая сеть процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

На рисунке обозначено:

- $Q_{рк}(s)$ – эквивалентная функция времени передачи данных по беспроводным каналам связи;
- $Q_{кан}(s)$ – эквивалентная функция времени передачи данных по проводным каналам связи протокола TCP;
- $Q_{ук1}(s) - Q_{ук6}(s)$ – эквивалентная функция времени обслуживания пакетов данных УК;
- P_7, P_8 – вероятность передачи данных через УК по маршрутам.

1. Определение эквивалентной функции процесса передачи данных по проводным каналам связи.

Представим описанный процесс передачи данных по проводным каналам связи в виде стохастической сети на рисунке 2.29.

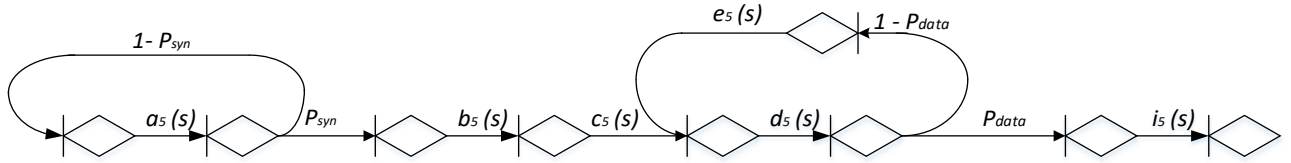


Рисунок 2.29 – Стохастическая сеть процесса передачи данных по проводному каналу связи

На рисунке обозначено:

- P_{syn} – вероятность подготовки установления соединения;
- P_{data} – вероятность процесса передачи данных;
- $a_5(s)$, $b_5(s)$, $c_5(s)$, $d_5(s)$, $e_5(s)$, $i_5(s)$ – ПЛС ФР времени формирования и отправки запроса на установление соединения, получения УК1 сегментов с флагами (SYN, ACK) от УК2, отправки в ответ УК1 сегмента с флагом (ACK) и перехода в состояние установленного логического соединения, отправки пакетов данных, повторного формирования данных для передачи, отправки сегмента с флагом (FIN) первым узлом коммутации.

Эквивалентная функция стохастической сети рисунка 2.29 имеет вид (2.37):

$$Q_{кан}(s) = \frac{a_5(s)P_{syn}b_5(s)c_5(s)d_5(s)P_{data}i_5(s)}{1 - a_5(s)(1 - P_{syn}) - d_5(s)(1 - P_{data})e_5(s) + a_5(s)(1 - P_{syn})d_5(s)(1 - P_{data})e_5(s)}. \quad (2.37)$$

Получим изображение (2.38):

$$Q_{кан}(s) = \left(\frac{\alpha_{кан}}{\alpha_{кан} + s} \right)^{\mu_{кан}}. \quad (2.38)$$

Результаты, полученные в пунктах 2.4, 2.5, позволяют определить эквивалентную функцию стохастической сети рисунка 2.28, но для упрощения определения эквивалентной функции укрупним стохастическую сеть (рисунок 2.30).

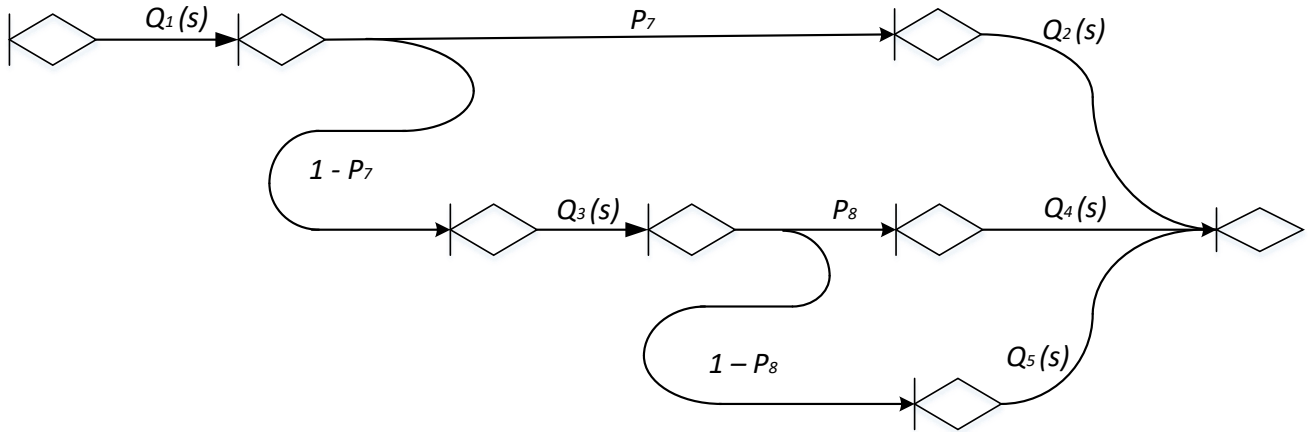


Рисунок 2.30 – Укрупнённая стохастическая сеть процесса функционирования фрагмента ТКС
ТКФС ОАО «РЖД»

Итоговая эквивалентная функция, для укрупнённой стохастической сети имеет вид (2.39):

$$Q_{ткс}(s) = Q_1(s)(P_7 Q_2(s) + [(1 - P_7) Q_3(s) \{(1 - P_8) Q_5(s) + P_8 Q_4(s)\}]), \quad (2.39)$$

где

$$Q_1(s) = Q_{yk1}(s) Q_{кан}(s);$$

$$Q_2(s) = Q_{yk2}(s) Q_{кан}(s) Q_{yk4}(s) Q_{кан}(s) Q_{pk}(s);$$

$$Q_3(s) = Q_{yk3}(s) Q_{кан}(s);$$

$$Q_4(s) = Q_{yk5}(s) Q_{кан}(s) Q_{pk}(s);$$

$$Q_5(s) = Q_{yk6}(s) Q_{кан}(s) Q_{pk}(s).$$

Получим итоговую функцию распределения в виде неполной гамма-функции (2.40):

$$F_{ткс}(t) = \frac{\alpha_{ткс}^{\mu_{ткс}}}{\Gamma(\mu_{ткс})} \int_0^t t^{\mu_{ткс}-1} e^{-\alpha_{ткс} t} dt, \quad (2.40)$$

Где

$\alpha_{ткс}$ – параметр формы;

$\mu_{ткс}$ – параметр масштаба.

Результаты расчёта по (2.40) представлены в виде графиков на рисунках 2.30 – 2.34.

Анализ результатов моделирования позволил сформулировать следующие выводы:

– вероятность успешной доставки данных по маршрутам передачи ТКС не может превышать некоторого максимального значения, определяемого при условии отсутствия внешних и внутренних факторов на узлы коммутации, при отсутствии потоков данных со стороны сторонних УК:

$$P_{max}(t \leq T_{зад}) = \lim_{\substack{\lambda_{01} - \lambda_{j6} \rightarrow 0 \\ P_{KB} \rightarrow 0 \\ \lambda_{KB} \rightarrow 0}} F_{ТКС}(t - T_{зад}).$$

При этом время доставки данных зависит от объёма пакетов данных, интенсивности поступающих данных, вида передаваемых данных, времени обслуживания данных узлами коммутации, времени передачи данных по проводным каналам связи, времени передачи данных по беспроводным каналам связи. Среднее время передачи пакетов данных в этом случае составляет $\overline{T_{ТКС}} = 1,29$ с, а вид функции распределения времени доставки пакетов данных показан на рисунке 2.31;

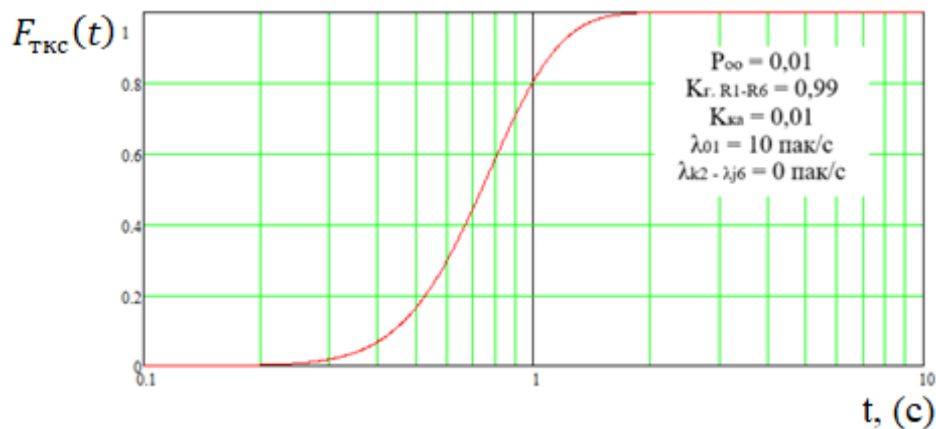


Рисунок 2.31 – Функция распределения времени передачи пакетов данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях отсутствия внешних и внутренних факторов

– в связи с тем, что ТКС ТКФС использует инфраструктуру ТКС ОАО «РЖД», то на УК поступают, как данные необходимые для управления объектами ТКФС, так и сторонний трафик. Это приводит к тому, что передаваемый трафик становится разнородным. Для описания передачи разнородного трафика

используются модели Вейбулла, Паретто. В случае передачи однородного трафика он описывается моделью Пуассона рисунок 2.32. При разнородном трафике время передачи данных в ТКС составляет $\overline{T}_{\text{ТКС}} = 12,3$ с, тогда как для однородного трафика время сокращается до $\overline{T}_{\text{ТКС}} = 11$ с. Следовательно, для повышения эффективности передачи данных необходимо осуществлять передачу только однородного трафика. При отсутствии внешнего трафика, поступающего от других УК, обслуживаемый трафик в ТКС ТКФС становится однородным рисунок 2.33. В этом случае интенсивность передачи данных определяется только значением $\lambda_{01} = 150$ пак/с, что позволяет значительно сократить время передачи данных. Например, при организации выделенной сети время передачи данных сокращается до $\overline{T}_{\text{ТКС}} = 1,54$ с, тогда как в условиях передачи разнородного трафика в общетехнологической ТКС оно составляет $\overline{T}_{\text{ТКС}} = 12,3$ с. Таким образом, для передачи критической информации использование общетехнологической сети увеличивает время передачи данных более чем в 10 раз, что не удовлетворяет требованиям к ТКС ТКФС;

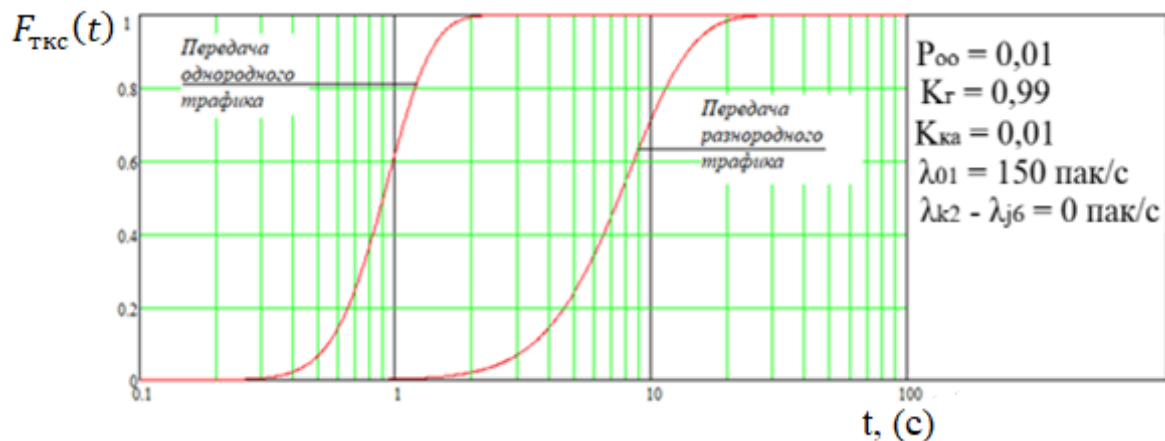


Рисунок 2.32 – Функции распределения времени передачи данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД» при различных видах трафика

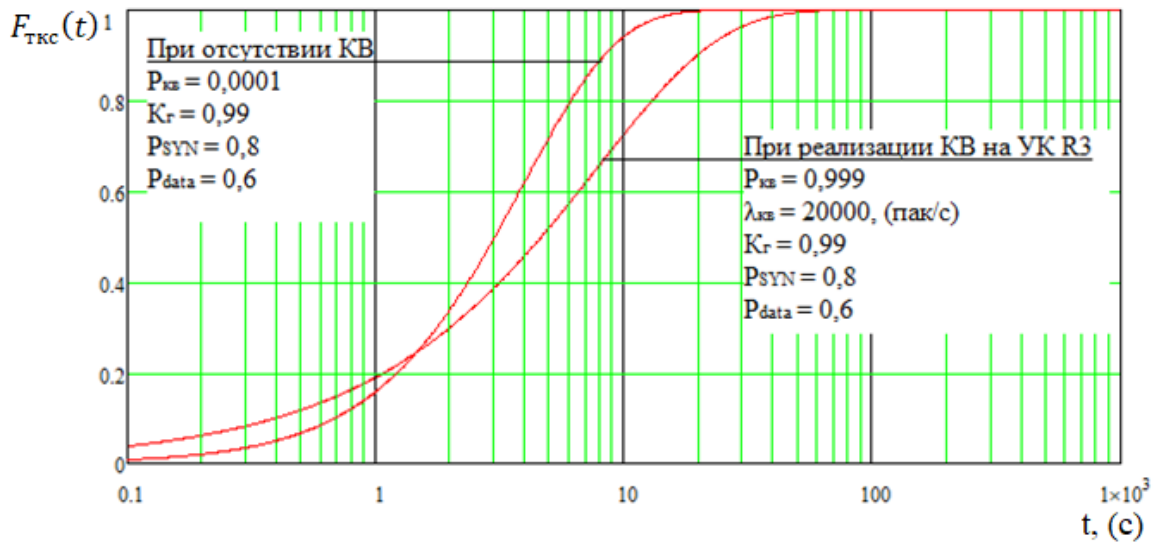


Рисунок 2.33 – Функции распределения времени передачи данных при отсутствии стороннего трафика, в условиях реализации дестабилизирующих факторов на узел R3

– на время процесса передачи данных в ТКС ТКФС влияют физические дестабилизирующие процессы на узлы коммутации, которые приводят к снижению коэффициента готовности УК. В случае снижения коэффициента готовности для всех узлов коммутации, при неизменном времени восстановления время передачи данных в ТКСкратно увеличивается (рисунок 2.34). При $K_r = 0,9$, время передачи данных в ТКС составляет $\overline{T}_{\text{ТКС}} = 11000$ с, а при $K_r = 0,3$ время передачи данных в ТКСкратно увеличивается до $\overline{T}_{\text{ТКС}} = 100000$ с. При высоком уровне коэффициента готовности достигается высокая надёжность и оперативность доставки данных в ТКС. Но даже при $K_r = 0,9$ время передачи данных в ТКС ТКФС не удовлетворяет требованиям по своевременности и достоверности доставки данных. Это указывает на необходимость реализации мер по мониторингу технического состояния узлов коммутации;

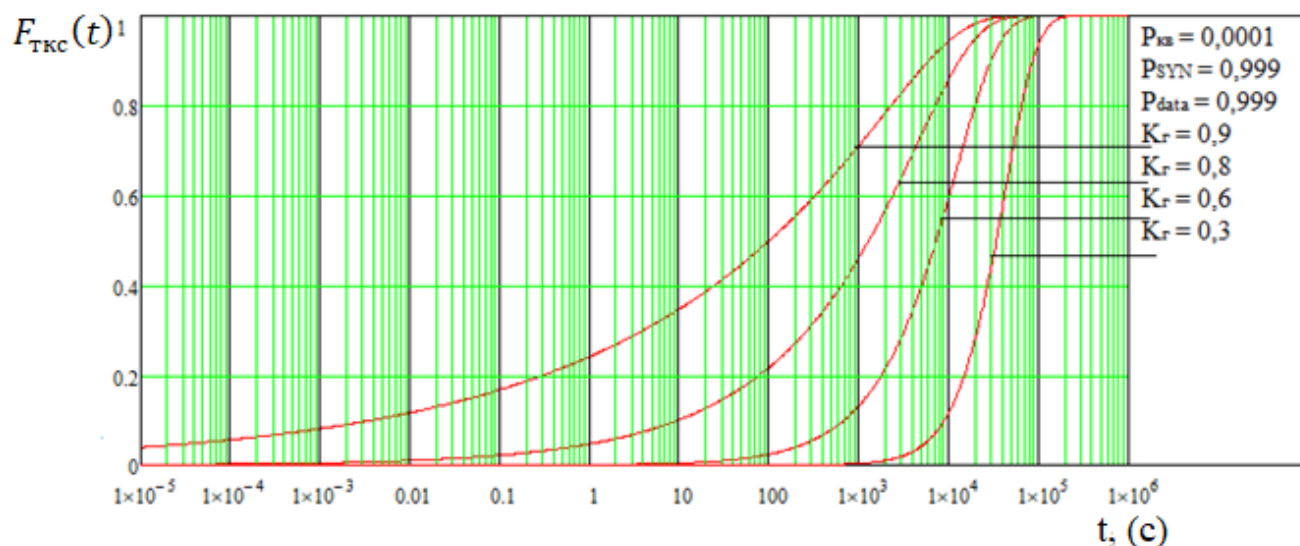


Рисунок 2.34 – Функции распределения времени передачи данных при отсутствии стороннего трафика, в условиях физических дестабилизирующих процессах на УК

– время восстановления функционирования УК влияет на время процесса передачи данных в ТКС, время восстановления показывает, сколько времени требуется всем УК для полного восстановления работоспособности (рисунок 2.35). При $\overline{T_{\text{восст}}} = 6000$ с, время передачи данных в ТКС составляет $\overline{T_{\text{ТКС}}} = 18000$ с, в случае снижения времени восстановления УК до $\overline{T_{\text{восст}}} = 500$ с, время передачи данных снизится до $\overline{T_{\text{ТКС}}} = 1700$ с. При высоких значениях времени восстановления, снижается общая надёжность ТКС.

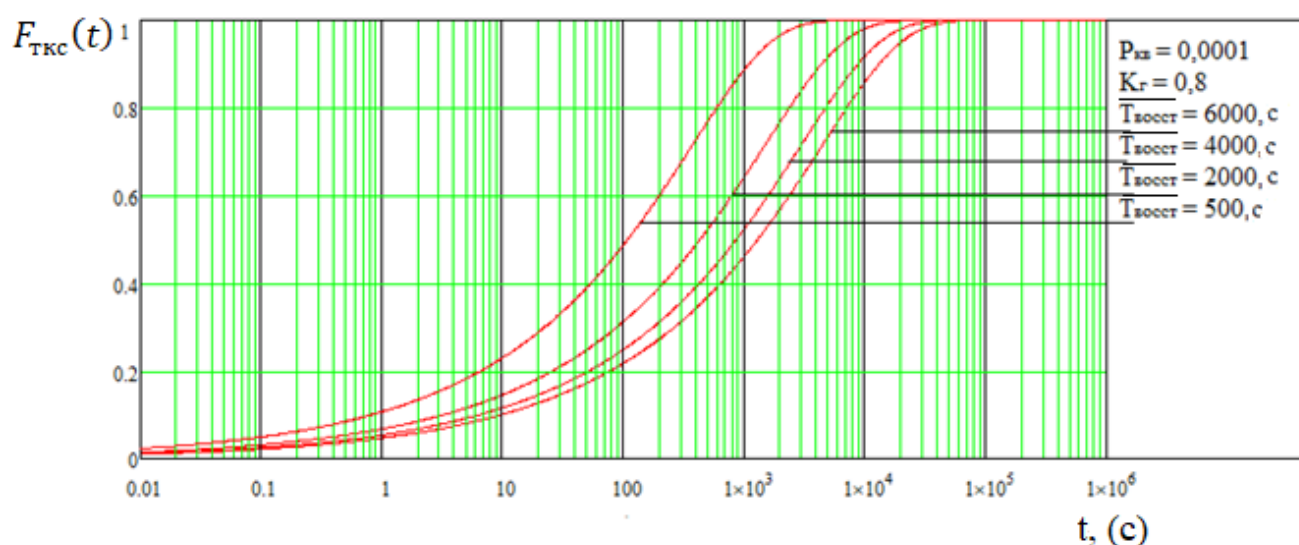


Рисунок 2.35 – Семейство функций распределения времени передачи данных при снижении времени восстановления функционирования УК

На основании общих принципов построения и функционирования современных ТКС и обеспечения своевременной доставки данных в ТКФС, разработана частная математическая модель процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД», отличающаяся тем, что учитывает реализацию совокупности дестабилизирующих факторов при произвольных распределениях времени поступления пакетов. Модель позволяет перейти к разработке комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

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

Управление движением поездов ТКФС осуществляется посредством обмена формализованными командами между управляющими и управляемыми объектами, различающимися по-своему объёму, содержанию и ценности, а значит, имеющими различные категории важности и срочности. Указанные категории присваиваются данным, содержащим следующие данные [29]:

- команды управления подвижным составом;
- карты маршрута движения;
- информация о состоянии железнодорожных путей;
- уведомления о работе системы посадки и высадки пассажиров;
- информация от системы автоведения подвижного состава.

Поэтому задача анализа и оценки процесса передачи данных в ТКС ТКФС ОАО «РЖД» должна учитывать дисциплину обслуживания, категоричность управляющих команд и основные характеристики трафика.

В работе [83] предложена методика оценки живучести распределённых информационно-телекоммуникационных сетей (ИТКС) на основе вариации количества линий и узлов связи. Хотя авторы учитывают, как случайные, так и преднамеренные помехи, их модель не включает ключевые параметры трафика, что снижает достоверность оценки живучести для систем реального времени. Кроме

того, в качестве внешних причин рассматриваются лишь физические помехи, игнорируя информационные деструктивные процессы, а также отсутствует учёт процессов восстановления после инцидентов и дифференцированного обслуживания сообщений по приоритету.

В работе [84] предложена полумарковская модель системы массового обслуживания (СМО) для динамического управления ТКС с целью минимизации средних затрат на обслуживание информационного потока. Однако модель не учитывает приоритизацию трафика, что делает её неприменимой к сетям, где критически важны различия между управляющими командами и служебными данными.

В работе [85] предложена модель для оценки устойчивости ИТКС к таргетированным компьютерным атакам (ТКА). Несмотря на актуальность подхода, модель не учитывает категорийность передаваемых данных и не оперирует параметрами качества функционирования (задержка, доступность, своевременность). В результате она не позволяет количественно оценить влияние воздействий на способность системы выполнять свои функции.

В статье [86] представлена математическая модель реализации DDoS-атаки на ИТКС, учитывающая воздействие на сетевые элементы. Однако данная модель фокусируется исключительно на процессе её реализации и не обеспечивает проведение оценки качества функционирования сети, что ограничивает её практическую применимость для систем, требующих гарантированного уровня обслуживания.

Наконец, в работе [87] исследуется эффективность совместной передачи разнородного трафика (речь и данные), и предложена модель для численной оценки производительности. Однако в модели отсутствует учёт внешних условий, что делает её непригодной для анализа работы сети в нестационарных или кризисных условиях.

Таким образом, ни одна из рассмотренных работ не обеспечивает комплексного учёта всех трёх ключевых аспектов, необходимых для оценки качества функционирования ТКС ТКФС:

- категорийности и приоритета информационных потоков;
- влияния совокупности дестабилизирующих факторов;
- динамики процессов восстановления и адаптации сети.

Это подтверждает наличие научного пробела и обосновывает необходимость разработки новой модели и методики, адекватно отражающей особенности ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, свободная от указанных выше недостатков. Модель учитывает процессы реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами, восстановления информационного обмена. Особенностью данной модели является снятие ограничений на вид используемых распределений случайного времени реализации частных процессов.

Постановка задачи.

Пусть имеется ТКС ТКФС, в которой заблаговременно или в процессе функционирования организуются маршруты передачи данных рисунок 2.36. Маршруты могут формироваться как динамически, так и статически.

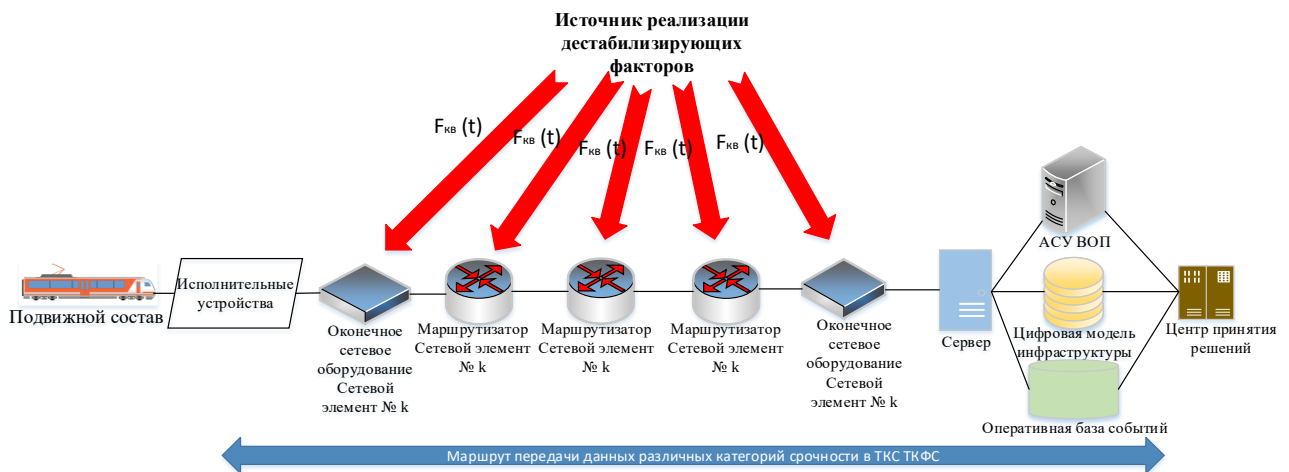


Рисунок 2.36 – Схема маршрута передачи данных различных категорий срочности в ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Положим, что каждый маршрут, обеспечивающий доставку данных различных категорий срочности, содержит $(k-1)$ участков и k узлов, которые

представляют включают в себя линии передачи, маршрутизаторы, узлы коммутации и конечные сетевые элементы, каждый из которых может быть подвержен дестабилизирующим факторам. Если за время доведения данных неблагоприятные процессы не реализуются, то подлежащие передаче данные i -ой категории будут успешно переданы за время $t_{\text{ТКС1}}$ с функцией распределения $F_{\text{ТКС1}}(t)$. В противном случае, за случайное время $t_{\text{КВ}}$ с функцией распределения $F_{\text{КВ}}(t)$ реализуется информационный дестабилизирующий фактор на ТКС и если реализация оказалась успешной, то за случайное время $t_{\text{ВС}}$ с функцией распределения $F_{\text{ВС}}(t)$ деструктивные условия обнаруживаются и выбирается альтернативный маршрут, по которому передача данных происходит за некоторое время $t_{\text{ТКС2}}$ с функцией распределения $F_{\text{ТКС2}}(t)$ [88].

Подлежащие передаче пакеты данных различаются по категориям срочности. При этом входящий трафик характеризуется моделью Вейбулла, учитывающей показатель Хёрста, а также длительность передаваемых сообщений и интенсивность их передачи. Если маршрут «занят» передачей ранее поступивших пакетов, то поступающий на передачу пакет данных i -й категории срочности ожидает обслуживания некоторое время t_{07i} с функцией распределения $O_{7i}(t)$, зависящее от случайного времени передачи данных по выбранному маршруту и объёма K буфера памяти.

Требуется определить функцию распределения $F_i(t)$ времени передачи категорийных данных в ТКС ТКФС ОАО «РЖД» [88].

При моделировании вводятся следующие ограничения и допущения:

- дестабилизирующие факторы носят целенаправленный характер;
- сбор информации о ТКС осуществляется с использованием технических средств;
- внешний источник располагает данными о уязвимых узлах и сетевых элементах;
- УК подвержены техническим отказам;

– вероятности, соответствующие ветвям стохастической сети, определяются известными методами [28, 31, 44, 45, 61, 62].

Решение.

Из постановки задачи следует, что стохастическая сеть должна содержать, по крайней мере, две цепи. Первая из них характеризуется отсутствием дестабилизирующих факторов, поэтому сеть функционирует в случайных условиях и характеризуется вероятностью $1 - Q_{\text{КВ}}(s + Q_{\text{ТКС1}})$. Возможное влияние случайных факторов учитывается на этапе проектирования, что обеспечивает успешное функционирование ТКС в этих условиях. С обратной вероятностью $Q_{\text{КВ}}(s + Q_{\text{ТКС1}})$, дестабилизирующие факторы реализуются в течение интервала времени передачи данных. После система восстановления обнаруживает внешние процессы, классифицирует и принимает меры по восстановлению, положим, что восстановление осуществляется на основании выбора альтернативного маршрута передачи данных.

Поэтому в стохастической сети нижняя ветвь правой части будет характеризоваться преобразованием Лапласа,

$$Q_{\text{КВ}}(s + Q_{\text{ТКС1}}) = \int_0^{\infty} \exp[-(s + Q_{\text{ТКС1}})t] f_{\text{КВ}}(t) dt, \quad (2.41)$$

где $f_{\text{КВ}}(t)$ – плотность распределения вероятностей времени успешной реализации информационного дестабилизирующего фактора.

В свою очередь, характеристикой верхней ветви правой части стохастической сети является:

$$1 - Q_{\text{КВ}}(s + Q_{\text{ТКС1}}) = \int_0^{\infty} \exp[-(s + Q_{\text{ТКС1}})t] f_{\text{КВ}}(t) dt. \quad (2.42)$$

Таким образом, укрупнённая стохастическая сеть процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях совокупности дестабилизирующих факторов имеет вид, представленный на рисунке 2.37.

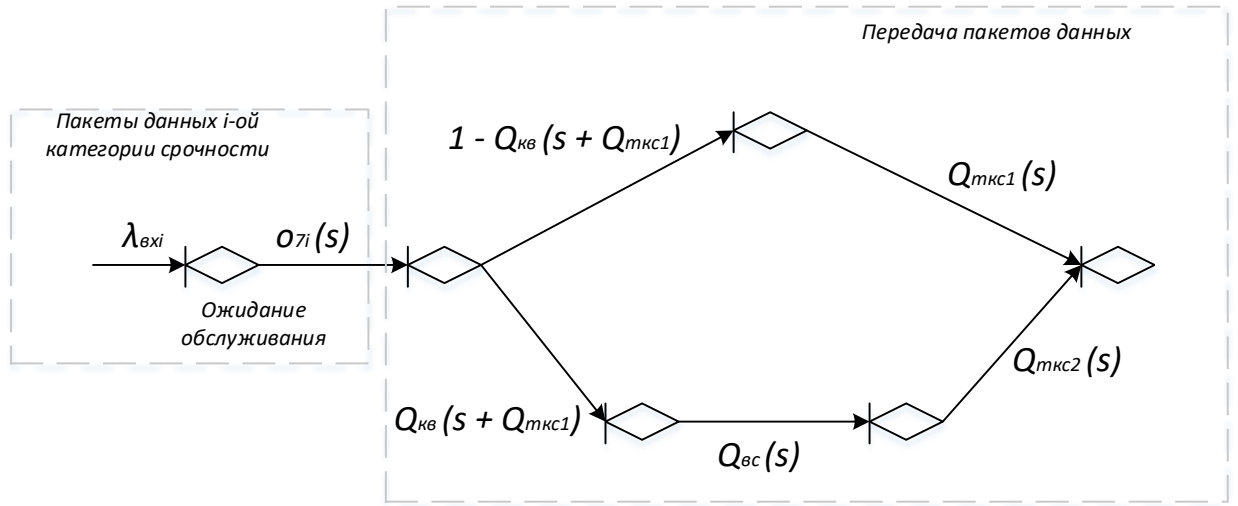


Рисунок 2.37 – Укрупнённая стохастическая сеть процесса функционирования ТКС ТКФС в условиях совокупности дестабилизирующих факторов

На рисунке 2.37 обозначено:

– $Q_{ткс1}(s), Q_{ткс2}(s), Q_{кв}(s), Q_{вс}(s)$ – эквивалентные функции времени доставки данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в случайных условиях, времени доставки данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД» после восстановления процесса передачи, времени успешной реализации дестабилизирующих факторов, времени восстановления;

– $o_{7i}(s)$ – ПЛС ФР времени ожидания обслуживания пакета данных i -й категории срочности, соответственно.

В пунктах 2.2 – 2.6 диссертации были получены функции распределения времени реализации процессов, а в пункте 2.4 было показано, что эти распределения могут быть аппроксимированы неполной гамма-функцией.

В пунктах 2.2 – 2.6 диссертации были получены изображения функций распределения частных процессов они будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 Q_{ТКС1}(s) &= \left(\frac{\alpha_{ТКС1}}{\alpha_{мкс1} + s} \right)^{\mu_{ТКС1}}; \\
 Q_{ТКС2}(s) &= \left(\frac{\alpha_{ТКС2}}{\alpha_{ТКС2} + s} \right)^{\mu_{ТКС2}}; \\
 Q_{Вс}(s) &= \left(\frac{\alpha_{Вс}}{\alpha_{Вс} + s} \right)^{\mu_{Вс}};
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

$$Q_{KB}(s) = \left(\frac{\alpha_{KB}}{\alpha_{KB} + s} \right)^{\mu_{KB}};$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_{TKC1} &= \frac{M_{1TKC1}}{D_{TKC1}}; \mu_{TKC1} = \frac{M_{1TKC1}^2}{D_{TKC1}}; \\ \alpha_{TKC2} &= \frac{M_{1TKC2}}{D_{TKC2}}; \mu_{TKC2} = \frac{M_{1TKC2}^2}{D_{TKC2}}; \\ \alpha_{BC} &= \frac{M_{1BC}}{D_{BC}}; \mu_{BC} = \frac{M_{1BC}^2}{D_{BC}}; \\ \alpha_{KB} &= \frac{M_{1KB}}{D_{KB}}; \mu_{KB} = \frac{M_{1KB}^2}{D_{KB}}. \end{aligned}$$

Из постановки задачи следует, что процесс доставки категорийных данных содержит подпроцесс ожидания обслуживания, характеризуемый преобразованием $o_{7i}(s)$.

Так как, для определения $o_{7i}(s)$ необходимо знать параметры случайного времени обслуживания (непосредственно передачи данных), то на первом этапе определим эквивалентную функцию правой части стохастической сети. На втором этапе определим эквивалентную функцию части стохастической сети, соответствующей процессу ожидания обслуживания. Данная последовательность решения задачи обусловлена, тем что длительность ожидания обслуживания сообщений различной категории срочности, зависит не только от параметров сетевого трафика, но и от длительности успешной передачи пакетов данных по выбранному маршруту.

Эквивалентная функция правой части стохастической сети (рисунок 2.36), с учётом категорийного трафика, имеет вид (2.44):

$$Q_{обсi}(s) = [1 - Q_{KB}(s + Q_{TKC1})]Q_{TKC1}(s) + \{Q_{KB}(s + Q_{TKC1})Q_{BC}(s)Q_{TKC2}(s)\}. \quad (2.44)$$

Подставляя (2.43) в (2.44), получим (2.45):

$$\begin{aligned}
Q_{обсi}(s) &= \left[\left(\frac{\alpha_{ТКC1}}{\alpha_{ТКC1} + s} \right)^{\mu_{ТКC1}} - \left(\frac{\alpha_{ТКC1}}{\alpha_{ТКC1} + s} \right)^{\mu_{ТКC1}} \times \left(\frac{\alpha_{KB}}{\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1} + s} \right)^{\mu_{KB}} \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{\alpha_{ТКC2}}{\alpha_{ТКC2} + s} \right)^{\mu_{ТКC2}} \times \left(\frac{\alpha_{KB}}{\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1} + s} \right)^{\mu_{KB}} \right] = \\
&= \left[\left(\frac{\alpha_{ТКC1}}{\alpha_{ТКC1} + s} \right)^{\mu_{ТКC1}} - \left(\frac{\alpha_{KB}}{\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1}} \right)^{\mu_{KB}} \times \left(\frac{\psi_i}{\psi_i + s} \right)^{\varphi_i} \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{\alpha_{KB}}{\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1}} \right)^{\mu_{KB}} \times \left(\frac{\vartheta_i}{\vartheta_i + s} \right)^{\xi_i} \right],
\end{aligned} \tag{2.45}$$

где

$$\begin{aligned}
T_{rri} &= \frac{\mu_{KB}}{(\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1})}; D_{rri} = \frac{\mu_{KB}}{(\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1})^2}; \\
\psi_i &= \frac{T_{rri} + M_{1ТКC1}}{(D_{rri} + D_{ТКC1})}; \varphi_i = \frac{(T_{rri} + M_{1ТКC1})^2}{D_{rri} + D_{ТКC1}}; \\
\vartheta_i &= \frac{T_{rri} + M_{1ТКC2} + M_{1BC}}{D_{rri} + D_{ТКC2} + D_{BC}}; \xi_i = \frac{(T_{rri} + M_{1ТКC2} + M_{1BC})^2}{D_{rri} + D_{ТКC2} + D_{BC}}.
\end{aligned}$$

Тогда, функция распределения времени передачи пакетов данных имеет вид (2.46):

$$\begin{aligned}
F_{обсi}(t) &= \left[\gamma_{i1}(\alpha_{ТКC1}t, \mu_{ТКC1}) - \gamma_{i2}(\psi_i t, \varphi_i) \left\{ \frac{\alpha_{KB}^{\mu_{KB}}}{(\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1})^{\mu_{KB}}} \right\} + \right. \\
&\quad \left. \gamma_{i3}(\vartheta_i t, \xi_i) \left\{ \frac{\alpha_{KB}^{\mu_{KB}}}{(\alpha_{KB} + \alpha_{ТКC1})^{\mu_{KB}}} \right\} \right].
\end{aligned} \tag{2.46}$$

В свою очередь, среднее время обслуживания (непосредственной передачи):

$$\begin{aligned}
T_{обсi} &= \int_0^\infty t d[F_{обсi}(t)] = (M_{1ТКC1} + [T_{rri} + M_{1ТКC1}] + [T_{rri} + \\
&\quad M_{1ТКC2} + M_{1BC}]),
\end{aligned} \tag{2.47}$$

а, дисперсия:

$$\begin{aligned}
D_{обсi} &= \int_0^\infty (t - T_{обсi})^2 d[F_{обсi}(t)] = (D_{ТКC1} + [D_{rri} + D_{ТКC1}] + [D_{rri} + \\
&\quad D_{ТКC2} + D_{BC}]).
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Определение (2.47 – 2.48) позволяет нам получить интенсивность времени обслуживания данных i-й категории срочности (2.49):

$$\mu_{fобсi} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{T_{обсi}}{D_{обсi}} - \frac{\left(\frac{T_{обсi}}{D_{обсi}} \right)^2 - 1}{t} \right]. \tag{2.49}$$

В заключении первого этапа определим квадратичный коэффициент вариации времени обслуживания (непосредственной передачи) в условиях внешних и внутренних факторов:

$$C_b^2 = \frac{D_{обсi}}{T_{обсi}^2}, \quad (2.50)$$

который при экспоненциальном характере функции, будет равен 1.

При определении функции распределения $O_i(t)$ времени, будем учитывать, что согласно работам [89-91] с точностью, достаточной для инженерных расчётов она может быть аппроксимирована неполной гамма-функцией.

$$o_i(s) = \int_0^\infty e^{-st} d[O_i(t)] = \left(\frac{l_i}{l_i + s} \right)^{\varepsilon_i}; i = 1, I. \quad (2.51)$$

Тогда, с учётом [92], можем определить параметры масштаба и формы функции распределения $O_i(t)$, используя следующий подход.

Положим, что общее число категорий срочности равно: $I, i = 1, I$, также, что $\Lambda_i = \sum_{j=1}^i \lambda_j$ – интенсивность суммарного потока категорийных сообщений, а интенсивность суммарной входящей нагрузки данных i -ой категорий срочности определяется с использованием (9), т.е.:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^i \frac{\lambda_j}{\mu_{f_{обсj}}}, \text{ где } i = 1, I.$$

С учётом результата в [92], полученного методом диффузной аппроксимации, было определено среднее время ожидания обслуживания в буфере памяти пакетов i -ого приоритета:

$$o_{1i} = \begin{cases} o_1^*, i = 1; \\ \frac{\Lambda_i}{\lambda_i} (o_{1i}^* - \frac{\lambda_{i-1}}{\Lambda_i} o_{1i-1}^*), i = 2, I, \end{cases}$$

где o_{1i}^* – среднее время ожидания обслуживания в бескатегорийном буфере памяти при суммарной входящей нагрузке ρ_i (без учёта приоритетов), равное:

$$o_{1i}^* = -o'_{1i}(s = 0) = \frac{\rho_i - (K+1)\rho_i^{K+1} + K\rho_i^{K+2}}{\mu_{f_{обслуж}}(1 - \rho_i - \rho_i^{K+2} + \rho_i^{K+3})}.$$

В свою очередь, второй момент времени ожидания обслуживания пакетов численно равен:

$$o_{2i} = \begin{cases} o_2^*, i = 1; \\ \left(\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} \right)^3 (o_{2i}^* - \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{\lambda_j}{\Lambda_i} \right)^3 o_{2i-1}^*), i = 2, I, \end{cases}$$

где: o_{2i}^* – второй момент времени ожидания обслуживания пакетов суммарного потока (без учёта приоритетов), равный:

$$o_{2i}^* = -o'_{2i}(s=0) = T_{\text{обс}i}^2 \frac{\rho_i [K \rho_i^K (1 - \rho_i) [\rho_i (K + 1) - K - 3] + 2(1 - \rho_i^K)]}{(1 - \rho_i^{K+2})(1 - \rho_i)^2}.$$

Дисперсия времени ожидания обслуживания пакетов i -ого приоритета равна:

$$Disp_i = \begin{cases} o_2 - o_1^2, i = 1; \\ \left(\left(\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} \right)^3 (o_{2i}^* - \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{\lambda_j}{\Lambda_i} \right)^3 o_{2i-1}^*) - \left[\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} (o_{1i}^* - \frac{\lambda_{i-1}}{\Lambda_i} o_{1i-1}^*) \right]^2 \right), i = 2, I. \end{cases}$$

Таким образом, параметры l_i и ε_i функции (2.52) равны:

$$l_i = \begin{cases} \frac{o_1}{o_2 - o_1^2}, i = 1; \\ \frac{\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} (o_{1i}^* - \frac{\lambda_{i-1}}{\Lambda_i} o_{1i-1}^*)}{\left(\left(\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} \right)^3 (o_{2i}^* - \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{\lambda_j}{\Lambda_i} \right)^3 o_{2i-1}^*) - \left[\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} (o_{1i}^* - \frac{\lambda_{i-1}}{\Lambda_i} o_{1i-1}^*) \right]^2 \right)}, i = 2, I, \end{cases} \quad (2.52)$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \frac{(o_1)^2}{o_2 - o_1^2}, i = 1; \\ \frac{\left[\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} (o_{1i}^* - \frac{\lambda_{i-1}}{\Lambda_i} o_{1i-1}^*) \right]^2}{\left(\left(\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} \right)^3 (o_{2i}^* - \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{\lambda_j}{\Lambda_i} \right)^3 o_{2i-1}^*) - \left[\frac{\Lambda_i}{\lambda_i} (o_{1i}^* - \frac{\lambda_{i-1}}{\Lambda_i} o_{1i-1}^*) \right]^2 \right)}, i = 2, I. \end{cases} \quad (2.53)$$

Подставляя (2.52) и (2.53) в (2.51), используя эквивалентные функции правой и левой частей стохастической сети (2.45) и (2.51), получим итоговую эквивалентную функцию стохастической сети (2.54):

$$Q_i(s) = o_i(s) Q_{\text{обс}i}(s) = \left(\frac{Z_i}{Z_i + s} \right)^{X_i} - \left(\frac{\alpha_{\text{KB}}}{\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\text{ТКС1}}} \right)^{\mu_{\text{KB}}} \times \left(\frac{H_i}{H_i + s} \right)^{J_i} + \left(\frac{\alpha_{\text{KB}}}{\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\text{ТКС1}}} \right)^{\mu_{\text{KB}}} \times \left(\frac{Y_i}{Y_i + s} \right)^{U_i}, \quad (2.54)$$

где

$$\begin{aligned} Z_i &= \frac{o_{1i} + M_{1\text{ТКС1}}}{(Disp_i + D_{\text{ТКС1}})}; X_i = \frac{(o_{1i} + M_{1\text{ТКС1}})^2}{(Disp_i + D_{\text{ТКС1}})}; \\ H_i &= \frac{o_{1i} + (Trri + M_{1\text{ТКС1}})}{Disp_i + (D_{rri} + D_{\text{ТКС1}})}; J_i = \frac{[o_{1i} + (Trri + M_{1\text{ТКС1}})]^2}{Disp_i + (D_{rri} + D_{\text{ТКС1}})}; \\ Y_i &= \frac{o_{1i} + (Trri + M_{1\text{ТКС2}} + M_{1\text{ВС}})}{Disp_i + (D_{rri} + D_{\text{ТКС2}} + D_{\text{ВС}})}; U_i = \frac{[o_{1i} + (Trri + M_{1\text{ТКС2}} + M_{1\text{ВС}})]^2}{Disp_i + (D_{rri} + D_{\text{ТКС2}} + D_{\text{ВС}})}. \end{aligned}$$

Используя обратное преобразование Лапласа и осуществляя обратный переход в пространство оригиналов, получим итоговую функцию распределения (2.55):

$$F_i(t) = \begin{cases} \left[\gamma_{11}(Z_1 t, X_1) - \gamma_{21}(H_1 t, J_1) \left\{ \frac{\alpha_{\text{KB}}^{\mu_{\text{KB}}}}{(\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\text{ТКС1}})^{\mu_{\text{KB}}}} \right\} + \gamma_{31}(Y_1 t, U_1) \left\{ \frac{\alpha_{\text{KB}}^{\mu_{\text{KB}}}}{(\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\text{ТКС1}})^{\mu_{\text{KB}}}} \right\} \right], i = 1 \\ \left[\gamma_{1i}(Z_i t, X_i) - \gamma_{2i}(H_i t, J_i) \left\{ \frac{\alpha_{\text{KB}}^{\mu_{\text{KB}}}}{(\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\text{ТКС1}})^{\mu_{\text{KB}}}} \right\} + \gamma_{3i}(Y_i t, U_i) \left\{ \frac{\alpha_{\text{KB}}^{\mu_{\text{KB}}}}{(\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\text{ТКС1}})^{\mu_{\text{KB}}}} \right\} \right], i = 2, I \end{cases} \quad (2.55)$$

Таким образом поставленная задача решена.

При расчётах предполагалась, что передаваемый трафик в ТКС содержит данные двух категорий срочности. Определим значения функции распределения времени процесса передачи данных в ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в дестабилизирующих условиях:

- количество категорий срочности – 2;
- среднее время выбора и реализации мер процесса восстановления передачи данных – $\overline{T_{\text{BC}}} = 950$ с;
- среднее время реализации информационного дестабилизирующего фактора – $\overline{T_{\text{KB}}} = 45$ с;
- средняя длительность передачи сообщений 1-ой категории срочности – $\overline{T_{1\text{кат}}} = 35$ с;
- средняя длительность передачи сообщений 2-ой категории срочности – $\overline{T_{2\text{кат}}} = 70$ с;
- интенсивность входящего потока сообщений 1-ой категории срочности в одном канале – $\lambda_1 = 0,9$ сообщ/с;
- интенсивность входящего потока сообщений 2-ой категории срочности в одном канале – $\lambda_2 = 0,1$ сообщ/с.

Анализ результатов моделирования:

- в случае реализации деструктивных условий на ТКС, вероятность успешной доставки данных различных категорий срочности за заданное время значительно снижается (рисунок 2.38). Расчёты показывают, что время успешной доставки данных увеличивается почти в 2 раза при заданном уровне вероятности своевременной доставки данных. Так, например, при $\overline{T_{\text{KB}}} = 320$ с., время доставки

данных 1-ой категории срочности при составляет $\overline{T}_{\text{пер}} = 44$ с., а при $\overline{T}_{\text{КВ}} = 32$ с. – $\overline{T}_{\text{пер}} = 56$ с. При тех же условиях, время доставки данных 2-ой категории срочности, составляет $\overline{T}_{\text{пер}} = 45$ с. ($\overline{T}_{\text{КВ}} = 320$ с.), а при $\overline{T}_{\text{КВ}} = 32$ с. время доставки составляет $\overline{T}_{\text{пер}} = 57$ с. При этом требованиям по вероятности своевременной доставки данных соответствуют процессы доставки данных второй и более низких категорий срочности. Это указывает на необходимость разработки взвешенной реализации методов восстановления, учитывающих категоричность передаваемых данных и основанных на затруднении доступности ТКС ТКФС для реализации дестабилизирующих факторов;

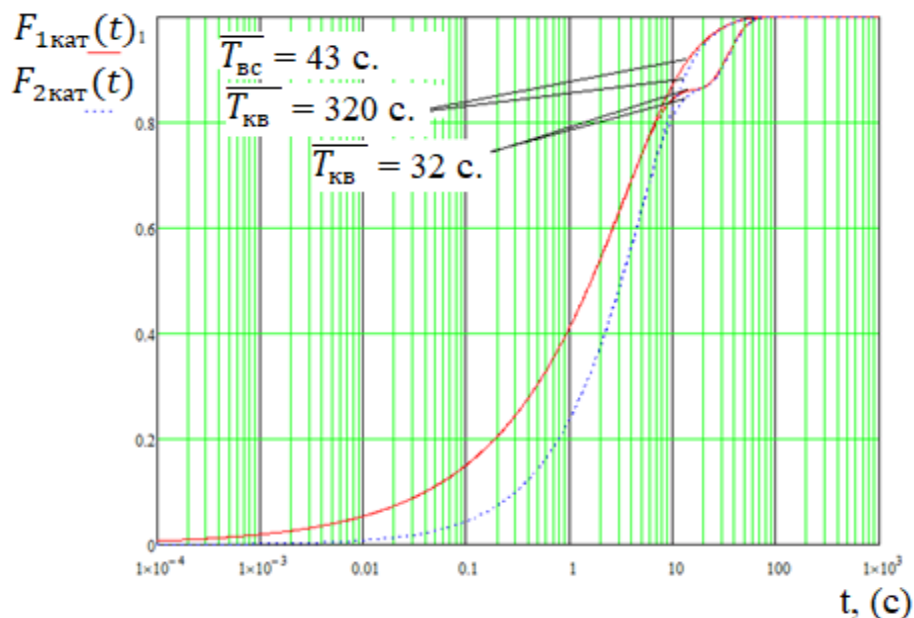


Рисунок 2.38 – Функции распределения времени успешной передачи данных 1-ой и 2-ой категорий срочности в ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях совокупности дестабилизирующих факторов

– в условиях дестабилизации функционирования ТКС, время доставки категоричных данных существенно увеличивается (рисунок 2.39). Так, например, при сокращении времени восстановления до $\overline{T}_{\text{вс}} = 14$ с., время доставки команд составит около $\overline{T}_{\text{пер}} = 29$ с., а при $\overline{T}_{\text{вс}} = 55$ с. – $\overline{T}_{\text{пер}} = 67$ с. (для 1-ой категории срочности). На основе результатов моделирования можно сделать вывод о том, что при времени восстановления $\overline{T}_{\text{вс}} \leq 14$ с., дестабилизирующие причины

практически не окажут влияния на процесс передачи данных. Это указывает на целесообразность и перспективность разработки методов прогнозирования, раннего обнаружения и оперативного восстановления ТКС.

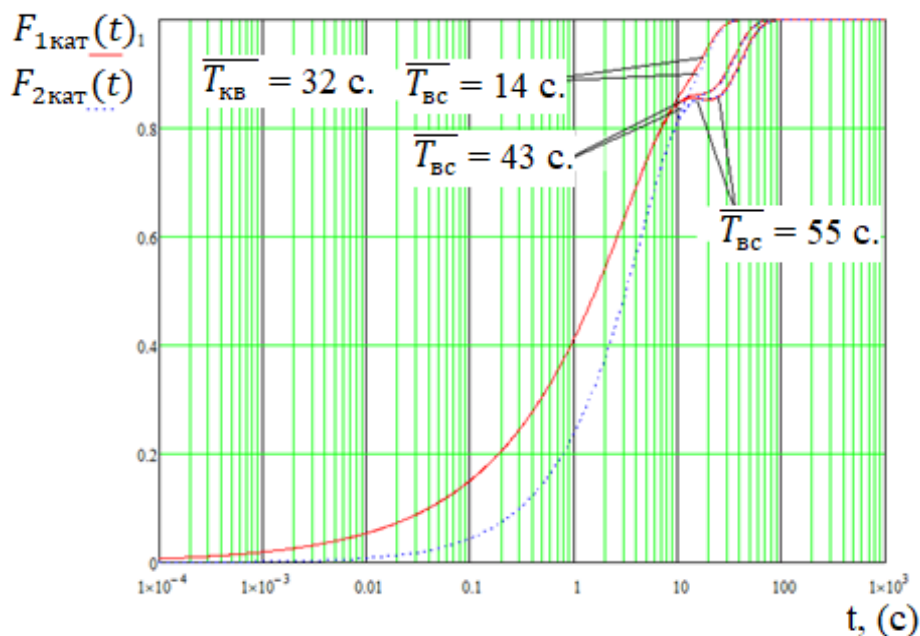


Рисунок 2.39 – Функции распределения времени передачи данных 1-ой и 2-ой категорий срочности в условиях совокупности дестабилизирующих факторов при различных значениях времени восстановления

Таким образом, результаты, полученные в результате моделирования комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, позволяют проводить оценку качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Результаты моделирования также являются частью исходных данных для разработки методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

2.8 Выводы по главе 2

1. На протяжении всего этапа моделирования был использован метод топологического преобразования стохастических сетей, который был доработан

автором для определения эквивалентной функции логического узла «Включающее И». Из-за высокой сложности процесса его моделирования выполнена декомпозиция на следующие частные процессы: передачи данных по беспроводным каналам связи, функционирования УК при влиянии дестабилизирующих факторов, реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами, восстановления информационного обмена, функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

2. Анализ возможных дестабилизирующих причин, проведённый в первой главе, показал, что наиболее вероятным на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» является фактор «Отказ в обслуживании». В отличие от существующих подходов, была разработана частная модель этого процесса, учитывающая полный цикл подготовки и реализации. Модель впервые интегрирует многоэтапность действий. Среднее время реализации зависит от длительности этапов вскрытия сети и формирования бот-сети. Это позволяет обосновывать меры противодействия, направленные на увеличение времени реализации процесса.

3. Разработана частная модель процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Модель впервые интегрирует энергетические характеристики радиоканала с учётом его уязвимости к внешним условиям, что принципиально отличает её от традиционных подходов. Модель учитывает три ключевых подпроцесса: установление соединения, передачу данных и поддержание установленного соединения. Особенностью является одновременная реализация передачи данных и поддержания установленного соединения, что отражает особенности функционирования реальных систем управления подвижным составом. С этой целью был предложен новый подход к определению эквивалентной функции стохастической сети, имеющей логический узел «Включающее И». Подход основан на разложении изображений функций плотности в ряд и последующей аппроксимации в виде неполной гамма-функции. Анализ результатов моделирования показал, что реализация внешних деструктивных факторов приводит к многократному ухудшению качества

передачи данных. При этом оперативность обнаружения становится главным фактором, что подтверждает необходимость в использовании систем раннего обнаружения.

4. Разработанная частная модель процесса функционирования УК ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов впервые комплексно учитывает совокупность дестабилизирующих факторов. Анализ показал, время доставки данных существенно зависит от их объёма. Использование пакетов фиксированного объёма обеспечивает минимальные задержки и джиттер. В то же время потоки Вейбулла и Парето характерные для реальных сетей, вызывают «пачечное» поступление данных, что приводит к росту задержек и увеличению вероятности потери пакетов данных – особенно при высоком индексе Хёрста из-за переполнения буферов узлов коммутации. Особую опасность представляет реализация совокупности внешних условий – это приводит к кратному увеличению времени передачи данных. Физические факторы снижают коэффициент готовности УК, что напрямую нарушает требования по своевременности доставки команд управления. Полученные результаты подтверждают, что традиционные подходы мониторинга и администрирования сетей недостаточны, требуется внедрение механизмов, направленных на ограничение дестабилизирующих факторов, сегментации трафика, оперативного мониторинга способного не только обнаруживать внешние факторы, но и прогнозировать функционирование ТКС.

5. Разработанная частная модель процесса функционирования фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД» позволила количественно оценить влияние ключевых факторов на время доставки данных в условиях дестабилизирующих факторов. Результаты моделирования показали, что при отсутствии внешних и внутренних причин среднее время передачи данных соответствует требованиям к своевременности для систем с высоким уровнем автоматизации. Однако при использовании общетехнологической инфраструктуры ОАО «РЖД», где трафик различных категорий срочности ТКФС смешивается со сторонним, разнородным трафиком, время доставки данных возрастает более чем в 9 раз. В то же время при организации выделенной сети с однородным трафиком это время снижается до 1,54

с., что подтверждает критическую необходимость строгой сегментации трафика и отказа от передачи команд управления по сетям ОБТН. Кроме того, в условиях дестабилизирующих факторов, даже при высоком коэффициенте готовности узлов коммутации ($K_g = 0,9$) время передачи данных достигает 11000 с., что делает управление подвижными объектами невозможным. При этом время восстановления информационного обмена оказывает прямое влияние на время передачи данных и его сокращение позволит уменьшить задержку передаваемых команд в 10 раз. Таким образом, модель однозначно демонстрирует, что передача критических данных по несегментированной, общетехнологической сети принципиально несовместима с требованиями ТКФС.

6. Разработанная комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, впервые обеспечивает возможность проведения оценки качества передачи данных с учётом: категорий срочности, времени реакции на дестабилизирующие явления и времени восстановления информационного обмена. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что даже при наличии альтернативных маршрутов передачи данных реализация совокупности дестабилизирующих факторов приводит к почти двукратному увеличению времени доставки критических команд. При этом сокращение времени восстановления позволяет снизить задержку передачи данных первой категории срочности почти в 2 раза. Полученные результаты однозначно демонстрируют, что функционирование ТКС ТКФС определяется не столько наличием резервных маршрутов, сколько оперативностью реакции на дестабилизирующие процессы. Это делает приоритетными следующие направления: затруднение доступности инфраструктуры, развитие систем раннего обнаружения и прогнозирования различных дестабилизирующих факторов, сокращение времени восстановления информационного обмена.

7. Анализ результатов моделирования позволяет выделить основные проблемы процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, указывающие на необходимость разработки

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

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

3.1 Выбор и обоснование показателей и критериев оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

Существуют исследования, посвященные исследованию устойчивости ТКС и сетей передачи данных (СПД), анализу процессов функционирования сети и её компонентов в различных условиях. Однако вопросы своевременной доставки данных часто остаются вне рассмотрения.

В работе [93] были предложены показатели устойчивости, основанные на связности графов. Сеть связи декомпозировалась на составные элементы, а устойчивость определялась вероятностью наличия хотя бы одного пути с требуемым качеством обслуживания (QoS).

В работе [94] представлена универсальная метрика для оценки эффективности сетей связи, основанная на соотношении полезного эффекта к затратам. Показатели качества были распределены по классам согласно заданным критериям, а в итоге получен обобщённый показатель Ливн, применимый для оценки объёма сети. Однако при расчётах не учитывались важнейшие показатели, такие как время и надёжность доставки данных.

Основным результатом работы [95] является методика оценки устойчивости сети специального назначения, включающая обобщённый показатель устойчивости функционирования. Однако в этой методике отсутствует учёт дестабилизирующих факторов, что не позволяет использовать её для комплексной оценки надёжности и безопасности связи в сетях специального назначения.

Исследования [96-98] посвящены оценке качества функционирования телекоммуникационных сетей, но вопросы надёжности передачи данных остались вне рассмотрения. Между тем, требования к СПД могут существенно различаться в зависимости от их назначения. В частности, к сетям связи специального назначения предъявляют особенно высокие требования к надёжности и безопасности, которые превышают стандарты, применяемые к менее критичным объектам.

Анализ работ [96-98] показывает, что оценка вероятности передачи данных за время, не превышающее заданное, в них не проводилась.

Согласно данным работы [44], уровень исходной устойчивости СПД зависит прежде всего от её технических и эксплуатационных характеристик. В применении к ТКС ТКФС ОАО «РЖД» можно выделить несколько факторов её снижающие:

- распределённость сети: ТКС ТКФС ОАО «РЖД» охватывает несколько регионов, что делает её уязвимой к внешним факторам;
- многоточечный доступ к сетям общего пользования: ТКС ТКФС ОАО «РЖД» имеет многочисленные точки доступа к сети общего пользования, используемой для обмена данными между подразделениями железнодорожного транспорта. Это повышает риск реализации неблагоприятных факторов, снижая общий уровень устойчивости;
- разнообразие операций с данными: ТКС ТКФС ОАО «РЖД» выполняет широкий спектр операций, включая модификацию, обработку и передачу данных, что создаёт множество потенциальных точек доступа;
- интеграция со сторонними ТКС: поскольку ТКС ТКФС ОАО «РЖД» получает и передаёт данные между различными железнодорожными службами, она интегрирована в ОбТН, в которую могут входить сторонние системы, увеличивая возможность несанкционированного доступа.

Эти особенности подчёркивают необходимость разработки методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» с учётом специфики её работы и требований, предъявляемых к объектам КИИ.

Согласно [5, 99], информационная безопасность определяется, как состояние достоверности передаваемой информации, обеспечиваемое мерами по обеспечению её конфиденциальности, целостности и доступности при передаче, обработке и хранении в ТКС. В условиях возможных дестабилизирующих факторов возникает необходимость оценки вероятностно-временных характеристик передачи данных.

К основным свойствам системы управления ТКС относятся устойчивость, непрерывность, оперативность и скрытность. Согласно [100], под устойчивостью функционирования сети связи понимается её способность выполнять заданные функции при нарушении её работоспособности в условиях внешних причин. Для обеспечения этих свойств ТКС должна реализовывать свой целевой процесс доставки данных с соблюдением требований к своевременности, достоверности и безопасности. В свою очередь, система управления ТКС должна обладать следующими качествами: устойчивостью, заданной пропускной способностью, мобильностью, боеготовностью, разведзащищённостью и доступностью. Исходя из этого, при выборе показателя оценки качества функционирования ТКС свойство устойчивости рассматривается с точки зрения сохранения своевременной доставки данных, даже в условиях совокупности внешних и внутренних факторов.

Разработка методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, является актуальной задачей. Существующие методы управления ТКС часто оказываются недостаточными для эффективного противодействия нарушению доставки данных. Это может приводить к сбоям в управлении перевозками, а в случае ТКФС – к серьёзным последствиям вплоть до аварий и катастроф, поскольку именно через ТКС осуществляется управление её объектами. В этом случае показателем качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», является вероятность своевременной доставки данных.

Представленная комплексная модель, учитывает процессы влияющие на процесс передачи данных объектам управления и позволила выявить новые закономерности процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Было

выявлено влияние дестабилизирующих факторов на время доставки данных. Проведение оценки предполагает сравнение полученных значений со значениями показателей, определяемых в качестве рекомендуемых Государственным стандартом Российской Федерации [31].

Задача разработки методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, является актуальной задачей так, как используемые системы мониторинга и управления направлены на разработку, внедрение, анализ, поддержание и совершенствование устойчивости ТКС ТКФС ОАО «РЖД» [4,5].

Следовательно, для проведения оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, необходимо учитывать показатель вероятности своевременной передачи данных $P_{св}(t)$. Этот показатель позволяет разработать методику оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

3.2 Структура и содержание методики оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»

Назначение методики заключается в оценке качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» по показателю, согласованному с требованиями по доставке данных объектам управления с помощью ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Цель – определение основных направлений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», а также выявления причин несоответствия ТКС ТКФС предъявляемым требованиям качества функционирования.

Исходные данные, используемые в методике, соответствуют нормативным и руководящим документам, а также требованиям ГОСТ по защите информации [28, 31, 44, 45, 61, 62]. Эти данные описывают: конфигурацию исследуемой ТКС ТКФС

ОАО «РЖД», принципы и возможности функционирования СОВ и СУИБ, алгоритмы работы СОВ, состояние среды общего доступа.

Часть исходных данных была получена в результате моделирования процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Данные используемые в методике представлены в таблице 3.1. Основным показателем оценки выбрана вероятность своевременной передачи данных: $P_{св}\{t_{пер} \leq T_{зад}\}$ [101], значения которого сравниваются с критериальными значениями [31].

Выбранный показатель определяется с использованием комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Критерий оценки: $P_{св}\{t_{пер} \leq T_{зад}\}$ [101].

Таблица 3.1 – Исходные данные для методики

№ п/п	Наименование параметра
Параметры топологии ТКС ТКФС ОАО «РЖД»	
1.	Количество узлов коммутации
2.	Количество базовых станций
3.	Количество центров управления движением объектов ТКФС
4.	Протокол передачи данных по проводным каналам связи
5.	Стандарт передачи данных по беспроводным каналам связи
6.	Количество категорий срочности
7.	$\lambda_{1к}$ – интенсивность сообщений 1-ой категории срочности
8.	$\lambda_{2к}$ – интенсивность сообщений 2-ой категории срочности
9.	$V_{1к}$ – объём одного сообщения 1-ой категории срочности
10.	$V_{2к}$ – объём одного сообщения 2-ой категории срочности
11.	$R_{бк}$ – пропускная способность беспроводного канала связи
12.	$R_{пк}$ – пропускная способность проводного канала связи (PON)
Параметры процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами	

1.	P_1 – вероятность подключения к элементу ТКС
2.	P_2 – вероятность ответа на отправленные тяжелые пакеты данных, сформированные бот-сетью
3.	$\overline{t_{a1}}$ – среднее время запуска и подготовки программы
4.	$\overline{t_{b1}}$ – среднее время анализа сетевого трафика
5.	$\overline{t_{c1}}$ – среднее время получения данных об используемых протоколах
6.	$\overline{t_{d1}}$ – среднее время вскрытия сети и определения узлов коммутации
7.	$\overline{t_{e1}}$ – среднее время формирования бот-сети
8.	$\overline{t_{i1}}$ – среднее время перехода в режим ожидания
9.	$\overline{t_{j1}}$ – среднее время отправки команд управления клиентам бот-сети
10.	$\overline{t_{k1}}$ – среднее время формирования устройствами бот-сети тяжелых пакетов данных
11.	$\overline{t_{l1}}$ – среднее время отправки пакетов данных
12.	$\overline{t_{m1}}$ – среднее время формирования новых тяжёлых пакетов
13.	$\overline{t_{n1}}$ – среднее время обслуживания тяжёлых пакетов
Параметры процесса восстановления информационного обмена	
1.	P_9 – вероятность принятия команды на исполнение
2.	$\overline{t_{a6}}$ – определения команды управления телекоммуникационным оборудованием
3.	$\overline{t_{b6}}$ – среднее время исполнения принятой команды
4.	$\overline{t_{c6}}$ – среднее время проверки команды на истинность
5.	$\overline{t_{d6}}$ – среднее время выбора мер восстановления
6.	$\overline{t_{e6}}$ – среднее время реализации выбранных мер восстановления
Параметры процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»	
Параметры процесса установления соединения	
1.	P_3 – вероятность приёма сигнала КВС
2.	P_4 – вероятность приёма сигналов УПС, КПС, Дистанции
3.	P_5 – вероятность приёма базовой станцией сигналов УПС, КПС и Дистанции после регулирования мощности
4.	$\overline{t_{a2}}$ – среднее время приёма сигнала КВС
5.	$\overline{t_{b2}}$ – среднее время приёма сигналов УПС, КПС, Дистанции
6.	$\overline{t_{c2}}$ – среднее время управления уровнем излучаемой мощности (УИМ)

Параметры процесса передачи данных	
1.	P_6 – вероятность реализации дестабилизирующего процесса
2.	$\overline{t_{d3}}$ – среднее время восстановления
Параметры процесса поддержания установленного соединения на время передачи данных	
1.	$\overline{t_{сз}}$ – время длительности команды на поддержание установленного соединения
Параметры процесса функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов	
1.	Длина пакета
2.	Модель распределения трафика
3.	Интенсивность поступающих пакетов на входы УК
4.	K_H – ёмкость накопителя для каждого УК
5.	H – индекс Хёрста
6.	$K_{г.1-6}$ – коэффициент готовности каждого УК
7.	$\overline{t_{d4}}$ – среднее время восстановление каждого УК
8.	n – количество входов у каждого УК
9.	P_{00} – вероятность реализации информационного дестабилизирующего процесса
10.	λ_{00} – суммарный поток пакетов источника

Последовательность вычисления показателя вероятности своевременной доставки данных представлена на рисунке 3.1 в виде блок-схемы.

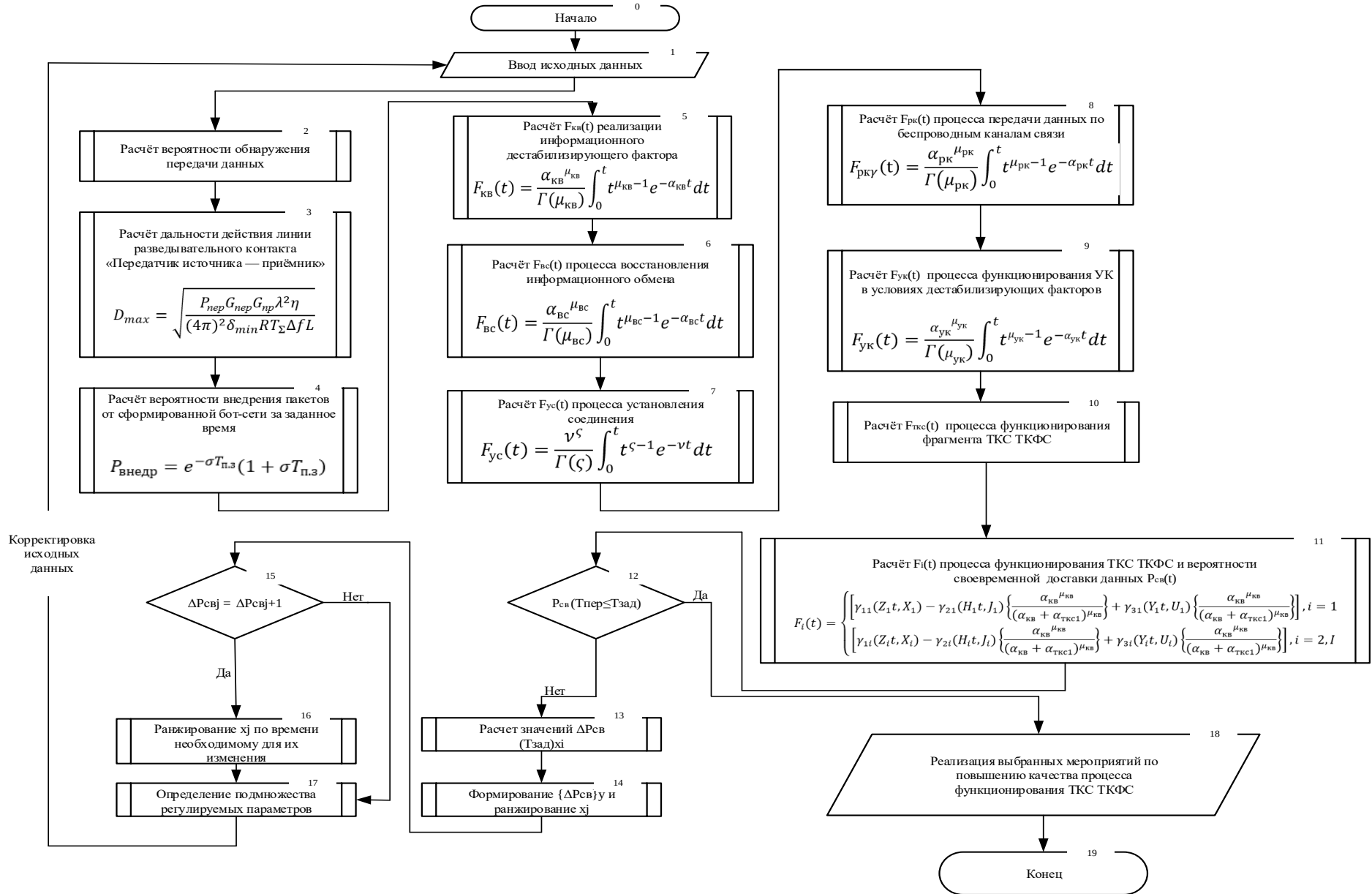


Рисунок 3.1 – Блок-схема этапов расчёта методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

При проведении расчётов используются данные из таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные данные для проведения расчётов

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
Параметры топологии ТКС ТКФС ОАО «РЖД»		
1.	Количество узлов коммутации	6
2.	Количество базовых станций	3
3.	Количество центров управления движением объектов ТКФС	1
4.	Протокол передачи данных по проводным каналам связи	TCP
5.	Стандарт передачи данных по беспроводным каналам связи	LTE-R
6.	Количество категорий срочности	2
7.	$\lambda_{1к}$ – интенсивность сообщений 1-ой категории срочности	10 (сообщ/с)
8.	$\lambda_{2к}$ – интенсивность сообщений 2-ой категории срочности	5 (сообщ/с)
9.	$V_{1к}$ – объём одного сообщения 1-ой категории срочности	50 (байт)
10.	$V_{2к}$ – объём одного сообщения 2-ой категории срочности	500 (байт)
11.	$R_{бк}$ – пропускная способность беспроводного канала связи	1 (Гбит/с)
12.	$R_{пк}$ – пропускная способность проводного канала связи (PON)	1 (Гбит/с)
Параметры процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами		
1.	P_1 – вероятность подключения к атакуемому элементу ТКС	0,5 – 0,99
2.	P_2 – вероятность ответа на отправленные тяжёлые пакеты данных, сформированные бот-сетью	0,5 – 0,99

3.	$\overline{t_{a1}}$ – среднее время запуска и подготовки программы	0,1 – 10 (с)
4.	$\overline{t_{b1}}$ – среднее время анализа сетевого трафика	0,1 – 60 (с)
5.	$\overline{t_{c1}}$ – среднее время получения данных об используемых протоколах	0,1 – 12 (с)
6.	$\overline{t_{d1}}$ – среднее время вскрытия сети и определения узлов коммутации	0,1 – 100 (с)
7.	$\overline{t_{e1}}$ – среднее время формирования бот-сети	0,1 – 60 (с)
8.	$\overline{t_{i1}}$ – среднее время перехода в режим ожидания	0,005 – 5 (с)
9.	$\overline{t_{j1}}$ – среднее время отправки команд управления клиентам бот-сети	1 – 10 (с)
10.	$\overline{t_{k1}}$ – среднее время формирования устройствами бот-сети тяжелых пакетов данных	0,1 – 10 (с)
11.	$\overline{t_{l1}}$ – среднее время отправки пакетов данных	1 – 24 (с)
12.	$\overline{t_{m1}}$ – среднее время формирования новых тяжёлых пакетов	0,1 – 12 (с)
13.	$\overline{t_{n1}}$ – среднее время обслуживания тяжёлых пакетов	1 – 10 (с)
Параметры процесса восстановления информационного обмена		
1.	P_9 – вероятность принятия команды на исполнение	0,5 – 0,99
2.	$\overline{t_{a6}}$ – определения команды управления телекоммуникационным оборудованием	0,2 – 1 (с)
3.	$\overline{t_{b6}}$ – среднее время исполнения принятой команды	0,2 – 1 (с)
4.	$\overline{t_{c6}}$ – среднее время проверки команды на истинность	0,1 – 1 (с)
5.	$\overline{t_{d6}}$ – среднее время выбора мер восстановления	0,5 – 5 (с)
6.	$\overline{t_{e6}}$ – среднее время реализации выбранных мер восстановления	0,5 – 1 (с)
Параметры процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД»		
<i>Параметры процесса установления соединения</i>		
1.	P_3 – вероятность приёма сигнала КВС	0,7 – 0,99
2.	P_4 – вероятность приёма сигналов УПС, КПС, Дистанции	0,7 – 0,99

3.	P_5 – вероятность приёма базовой станцией сигналов УПС, КПС и Дистанции после регулирования мощности	0,6 – 0,99
4.	$\overline{t_{a2}}$ – среднее время приёма сигнала КВС	0,05 – 0,1 (с)
5.	$\overline{t_{b2}}$ – среднее время приёма сигналов УПС, КПС, Дистанции	0,001 – 0,2 (с)
6.	$\overline{t_{c2}}$ – среднее время управления уровнем излучаемой мощности (УИМ)	0,001 – 0,05 (с)
Параметры процесса передачи данных		
1.	P_6 – вероятность реализации дестабилизирующего процесса	0,6 – 0,8
2.	$\overline{t_{d3}}$ – среднее время восстановления	17 – 40 (с)
Параметры процесса поддержания установленного соединения на время передачи данных		
1.	$\overline{t_{c3}}$ – время длительности команды на поддержание установленного соединения	0,0001 (с)
Параметры процесса функционирования УК в условиях дестабилизирующих факторов		
1.	Длина пакета	Переменная
2.	Модель распределения трафика	Распределение Вейбулла
3.	Интенсивность поступающих пакетов на входы УК	$\lambda_{k2} = 3000$ (пак/с); $\lambda_{n3} = 3000$ (пак/с); $\lambda_{m4} = 4000$ (пак/с); $\lambda_{e5} = 4000$ (пак/с); $\lambda_{j6} = 10000$ (пак/с);
4.	K_H – ёмкость накопителя для каждого УК	30 (пак)
5.	H – индекс Хёрста	0,5
6.	$K_{г.1-6}$ – коэффициент готовности каждого УК	0,7 – 0,999
7.	$\overline{t_{d4}}$ – среднее время восстановления каждого УК	5000 (с)
8.	n – количество входов у каждого УК	3

9.	P_{oo} – вероятность реализации информационного дестабилизирующего процесса	0,5 – 0,99
10.	λ_{oo} – суммарный поток пакетов атаки	200000 (пак/с)

Методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, содержит следующие этапы [101].

Блок 1: ввод исходных данных.

Блок 2: расчёт вероятности обнаружения передачи данных источником дестабилизирующих факторов. Вероятность определяется с учётом технических средств мониторинга и администрирования, реализованных в ТКС ТКФС ОАО «РЖД», с использованием нормативных документов [28, 31, 44, 45, 61, 62].

Блок 3: расчёт дальности действия линии разведывательного контакта «Передатчик источника — приёмник» определяется энергией (мощностью) передатчика и может быть рассчитана с помощью следующей формулы [61]:

$$D_{max} = \sqrt{\frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр} \lambda^2 \eta}{(4\pi)^2 \delta_{min} R T_{\Sigma} \Delta f L}},$$

где

- $P_{пер}$ – мощность передатчика;
- $G_{пер}$ – коэффициент усиления антенны передатчика;
- $G_{пр}$ – коэффициент усиления антенны приёмника;
- λ – длина волны передатчика;
- η – коэффициент потерь в среде распространения;
- δ_{min} – минимально допустимое превышение сигнала над шумом по мощности;
- R – постоянная Больцмана;
- T_{Σ} – суммарная шумовая температура на входе приёмника;
- Δf – полоса сигнала;
- L – коэффициент запаса на не учитываемые факторы.

Блок 4: расчёт вероятности внедрения пакетов от сформированной бот-сети за заданное время, при условии, что поступившие пакеты от бот-сети сразу

поступают на обслуживание. Вероятность рассчитывается с учётом технических средств мониторинга и администрирования, реализуемых в ТКС ТКФС ОАО «РЖД», с использованием [28,31,44,45,61,62].

Вероятность внедрения пакетов данных рассчитывается с использованием [31]:

$$P_{\text{внедр}} = e^{-\sigma T_{\text{п.з}}}(1 + \sigma T_{\text{п.з}}),$$

где

- σ – частота поступления пакетов данных от сформированной бот-сети;
- $T_{\text{п.з}}$ – заданное время.

Блок 5: расчёт функции распределения $F_{\text{кв}}(t)$ и времени реализации информационного дестабилизирующего процесса «Отказ в обслуживании». Семейство функций распределения $F_{\text{кв}}(t)$ времени реализации представлено на рисунке 3.2.

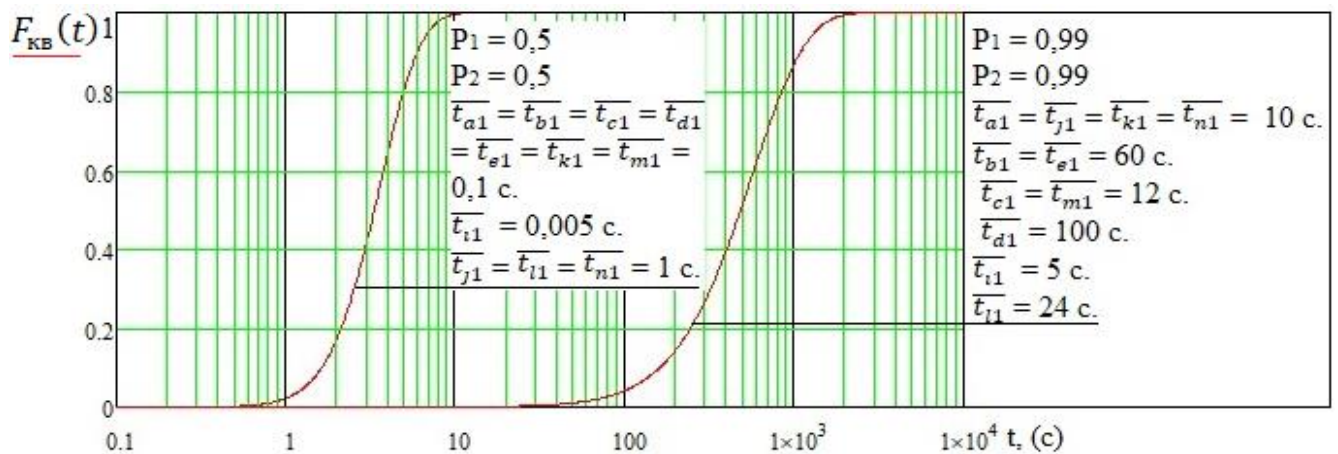


Рисунок 3.2 – Функции распределения времени реализации информационного дестабилизирующего процесса «Отказ в обслуживании»

Блок 6: расчёт функции распределения $F_{\text{вс}}(t)$ и времени восстановления информационного обмена. Семейство функций распределения $F_{\text{вс}}(t)$ времени восстановления информационного обмена представлено на рисунке 3.3.

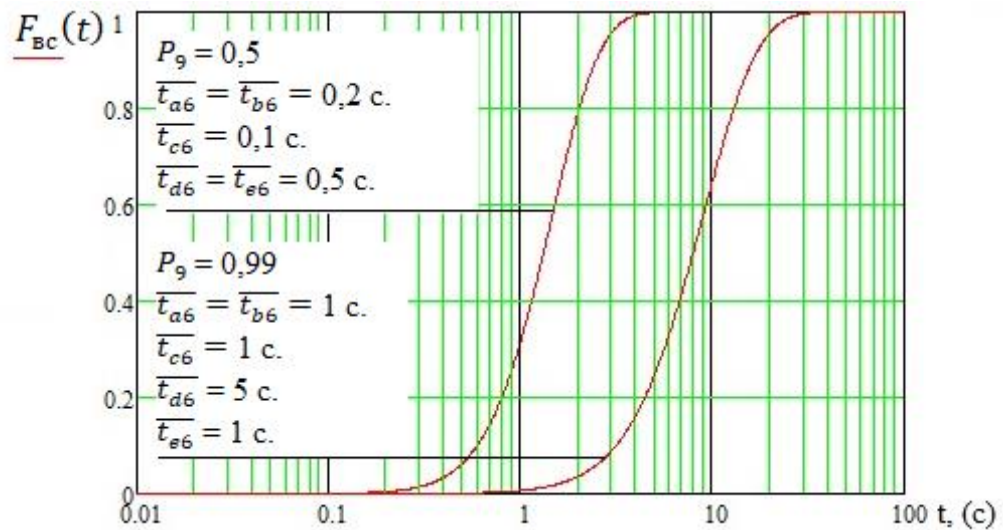


Рисунок 3.3 – Функции распределения времени реализации восстановления информационного обмена

Блок 7: расчёт функции распределения $F_{yc}(t)$ и времени установления соединения по беспроводному каналу связи [75]. Семейство функций распределения $F_{yc}(t)$ времени установления соединения по беспроводному каналу связи представлено на рисунке 3.4.

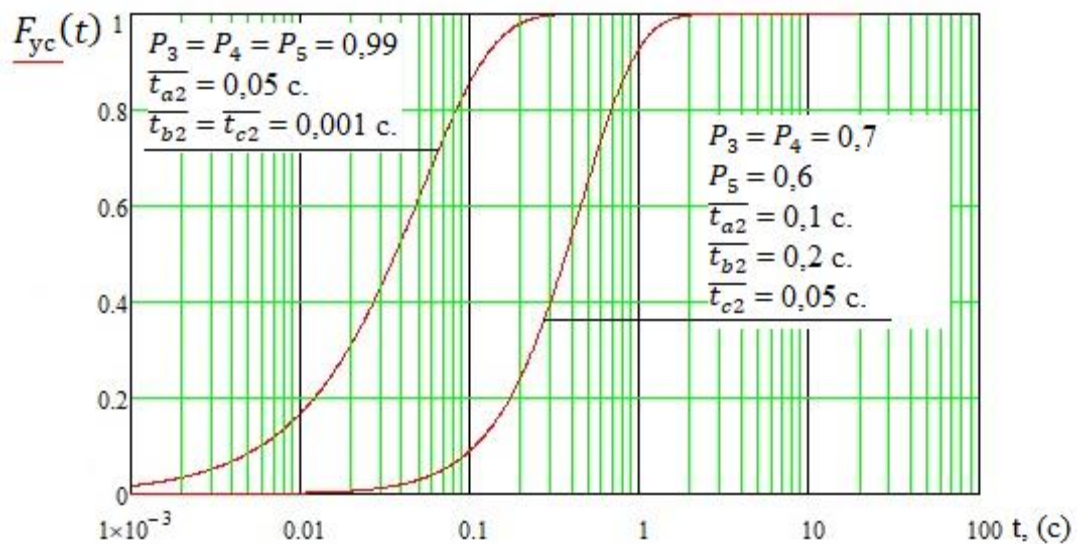


Рисунок 3.4 – Функции распределения времени установления соединения по беспроводному каналу связи

Блок 8: расчёт функции распределения $F_{рк\gamma}(t)$ и времени передачи данных по беспроводным каналам связи [72-74]. Семейство функций распределения $F_{рк\gamma}(t)$ времени передачи данных по беспроводным каналам связи представлено на рисунке 3.5.

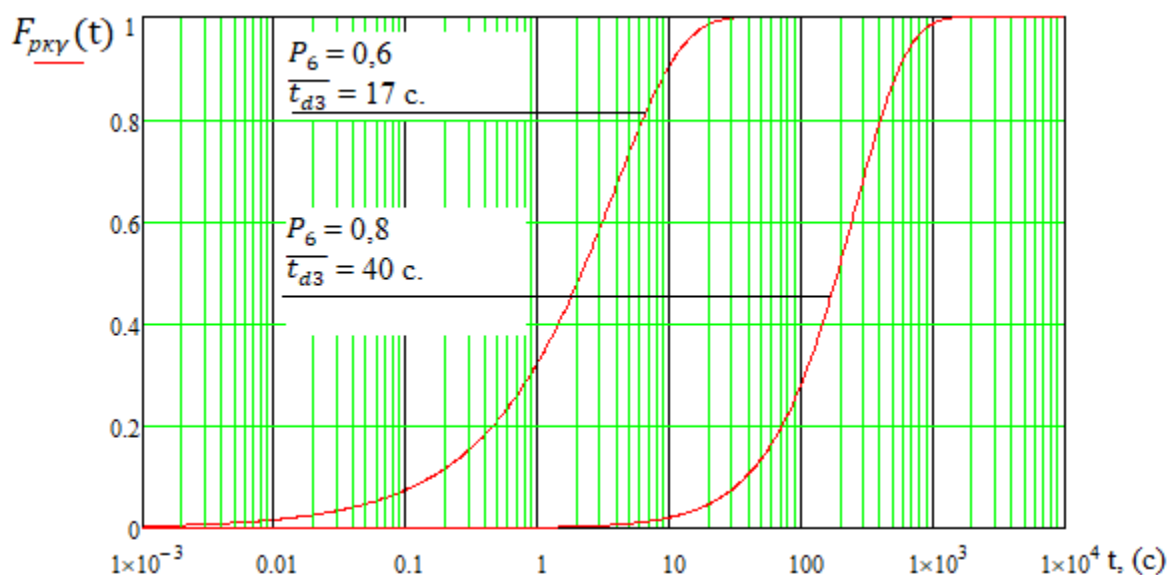


Рисунок 3.5 – Функции распределения времени передачи данных по беспроводным каналам связи

Блок 9: расчёт функции распределения $F_{ук}(t)$ и времени обслуживания данных узлами коммутации в условиях дестабилизирующих факторов [78,79]. Пояснение расчётов приведено в пункте 2.5 диссертации.

Блок 10: расчёт функции распределения $F_{ткс}(t)$ и времени передачи данных по фрагменту ТКС ТКФС ОАО «РЖД» [79]. Пояснение расчётов приведено в пункте 2.6 диссертации.

Блок 11: расчёт функции распределения $F_i(t)$ и времени передачи данных в ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов [88]. Результаты расчёта вероятности своевременной доставки данных $P_{св}(t)$ представлены на рисунках 3.6, 3.7.

Расчёт показателя вероятности своевременной доставки данных $P_{св}(t)$, является функцией распределения, полученной в блоке 11. В соответствии с [17], для систем, в которых возможны отказы при передаче данных, дополнительно

учитываются показатели, характеризующие вероятность их потери в процессе обслуживания.

Выполняется сравнение вычисленных значений из блока 11 с установленными нормативами. Полученный показатель $P_{\text{св}}(\overline{T_{\text{пер}}})$ сопоставляется с требуемыми значениям: для сообщений 1-й категории срочности $P_{\text{св}} = 0,999$ при $T_{\text{зад}} \leq 1, (\text{с})$, для сообщений 2-й категории срочности $P_{\text{св}} = 0,99$ при $T_{\text{зад}} \leq 5, (\text{с})$. Если условие выполняется, осуществляется переход к блоку 18, где подтверждается применимость научно-технических предложений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

В противном случае, необходимо внедрение научно-технических предложений, направленных на сокращение времени передачи данных, циркулирующих в ТКС ТКФС ОАО «РЖД», с последующей корректировкой исходных данных.

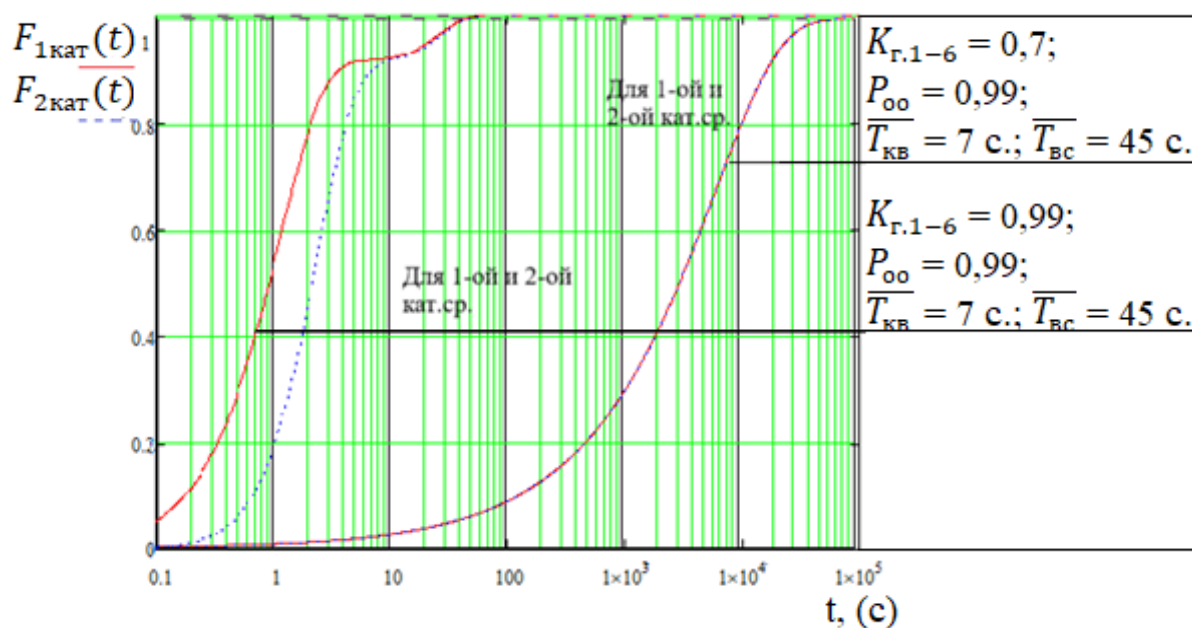


Рисунок 3.6 – Функции распределения своевременной доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности

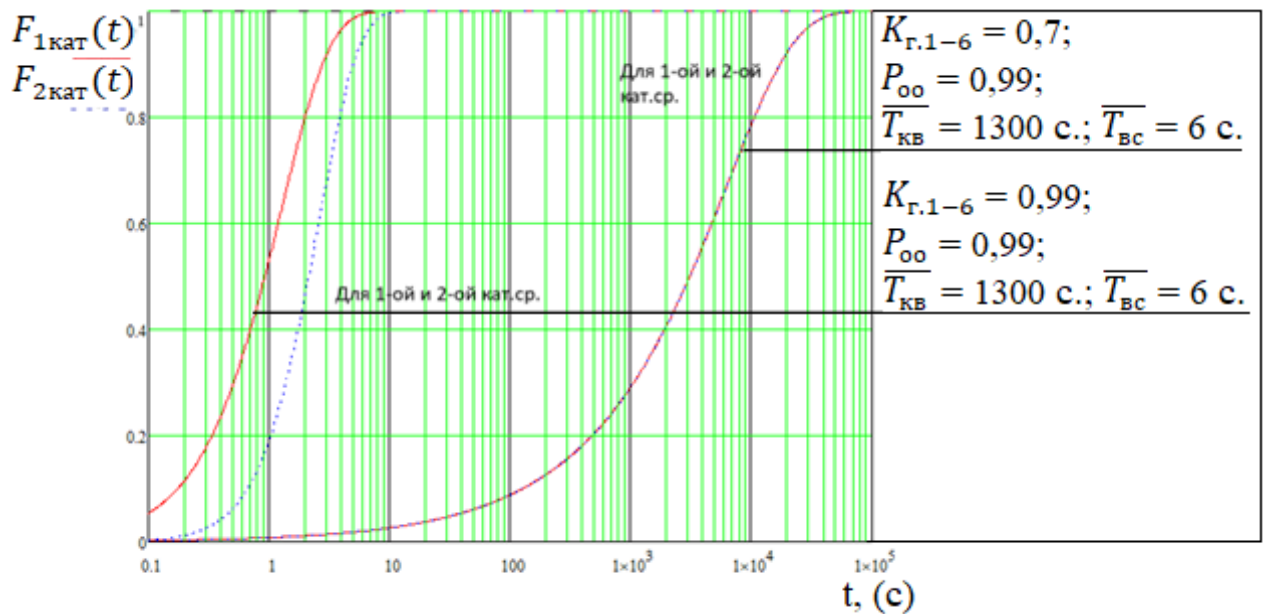


Рисунок 3.7 – Функции распределения своевременной доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности в различных условиях

Расчётные соотношения методики соответствуют разработанной комплексной модели функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Разработанная методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, позволяет проводить не только оценку качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», но и осуществлять выбор рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях совокупности деструктивных факторов. Методика позволяет выработать рациональные организационно-технические мероприятия по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

3.3 Методика выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной системы транспортной киберфизической системы (ТКС ТКФС) ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, предусматривает следующий подход: если рассчитанное значение вероятности своевременной доставки не соответствует требованиям нормативных документов [31], то необходимо реализовать рациональные мероприятия по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», скорректировать исходные данные и повторно выполнить расчёт.

В этом случае при постоянном изменении исходных данных сравнение показателя оценки с критериальными значениями будет реализовано уже после снижения качества функционирования ТКС. Необходимо проводить взвешенную процедуру выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС. Такой подход должен учитывать не только стоимость и сроки внедрения, но и вклад каждого мероприятия в достижение целевых показателей качества, таких как своевременность доставки данных и устойчивость к дестабилизирующим факторам. Кроме того, реализация этого подхода должна осуществляться параллельно с проведением расчётов по разработанной методике.

Для решения этой задачи разработанная методика была расширена за счёт включения блоков 13-17, формирующих методику выбора рациональных организационных мер.

Целью является определение и выбор рациональных мероприятий, реализация которых позволяет обеспечивать требуемый уровень вероятности своевременной доставки данных [31].

Назначение методики состоит в анализе степени влияния параметров исходных данных, на реализацию условий для сообщений 1-й категории срочности $P_{\text{св}} = 0,999$ при $T_{\text{зад}} \leq 1$, (с), для сообщений 2-й категории срочности $P_{\text{св}} = 0,99$ при $T_{\text{зад}} \leq 5$, (с).

Внедрение данного подхода позволит на этапе ввода исходных данных определить не только оценочные данные характеризующие объект, но и задать диапазон изменения исходных данных, это позволит сформировать два параллельных вычислительных процесса, которые обеспечат к моменту получения оценки ранжированное множество параметров от которых зависит качество функционирования ТКС ТКФС «РЖД».

В качестве показателя степени зависимости качества функционирования ТКС ТКФС используется приращение вероятности своевременной доставки данных $\Delta P_{\text{св}}(T_{\text{зад}})$. Критерием отбора наиболее значимых параметров выступает максимизация этого приращения:

$$\max_i \{ \Delta P_{\text{св}}(T_{\text{зад}}, x_i), i = \overline{1, N} \}, \quad (3.1)$$

где x_i – частные процессы, используемые при моделировании в качестве исходных данных [72, 73, 74, 75, 79, 101].

Ввиду того, что параметры процессов могут изменяться, в расчёте учитываются диапазоны их возможных изменений: $\Delta x_i = x_{i\text{к}} - x_{i\text{н}}$ [54, 56, 101, 102].

Постановка задачи

Пусть функция $P_{\text{св}}$ описывает вероятность своевременной доставки данных в ТКС ТКФС. Значение функции изменяется из-за влияния множества процессов. Требуется определить степень влияния каждого параметра вероятность своевременной доставки данных, то есть найти [54, 56, 101, 102]:

$$N_i = \max f(\Delta P_{\text{св}}(t)_{x_i}). \quad (3.2)$$

Решение

Поскольку задача ранжирования не предъявляет жёстких требований к точности — достаточно лишь определить направление изменения и выделить

наиболее значимый параметр, — в качестве подхода выбран градиентный метод Гаусса–Зейделя. Его ключевые преимущества состоят в низкой вычислительной сложности и возможности уточнения решения без необходимости полного пересчёта всех компонентов на каждом шаге, что обеспечивается свойством вложенности моделей.

Первым шагом является определение $\Delta P_{\text{св}}(t)_{x_i}$. Для этого необходимо определить частные производные функции $P_{\text{св}}(t, x_i)$ по каждому из параметров x_i , изменяющихся в некоторых пределах Δx_i . Это возможно, так как по условию $P_{\text{св}}(t, x_i)$ является аналитической в области определения каждой переменной $x_i, i = \overline{1, N}$. Применяя теорему Лагранжа, получим [54]:

$$\Delta P_{\text{св}}(t, x_i, i = \overline{1, N}) = \frac{dP_{\text{св}}(t, x_i, i = \overline{1, N})}{dx_i} \Delta x_i. \quad (3.3)$$

Ввиду того, что преобразование Лапласа является линейным это позволяет использовать вместо функций распределения $F_{\text{кв}}(t), F_{\text{вс}}(t), F_{\text{рк}}(t), F_{\text{ук}}(t)$ производящую функцию $F_{\text{кв}}(s), F_{\text{вс}}(s), F_{\text{рк}}(s), F_{\text{ук}}(s)$, с использованием преобразования Лапласа. Это позволит получить тот же самый порядок влияния значений и диапазонов изменений параметров x_i на вероятность своевременной доставки данных [54]:

$$\Delta F_{\text{кв}}(s)_{x_i} = \frac{d\Delta F_{\text{кв}}(s)}{dx_i} \Delta x_i, \quad (3.4)$$

$$\Delta F_{\text{вс}}(s)_{x_i} = \frac{d\Delta F_{\text{вс}}(s)}{dx_i} \Delta x_i, \quad (3.5)$$

$$\Delta F_{\text{рк}}(s)_{x_i} = \frac{d\Delta F_{\text{рк}}(s)}{dx_i} \Delta x_i, \quad (3.6)$$

$$\Delta F_{\text{ук}}(s)_{x_i} = \frac{d\Delta F_{\text{ук}}(s)}{dx_i} \Delta x_i. \quad (3.7)$$

При расчётах все параметры, кроме x_i , фиксируются на начальном уровне $x_{i\text{н}}$. Подстановка $T_{\text{зад}}$ вместо t и $s = 1/T_{\text{зад}}$ в формулы (3.4 – 3.7) позволяет получить численные значения приращений, соответствующие требуемому уровню качества функционирования.

Ранжирование этих значений по убыванию формирует упорядоченный вектор $\{\Delta P_{\text{св}}\}_y$, где каждому элементу сопоставлен конкретный параметр модели.

Это даёт основание для обоснованного выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС.

Порядок реализации представлен на рисунке 3.8 в виде этапов (блоки 13-17).

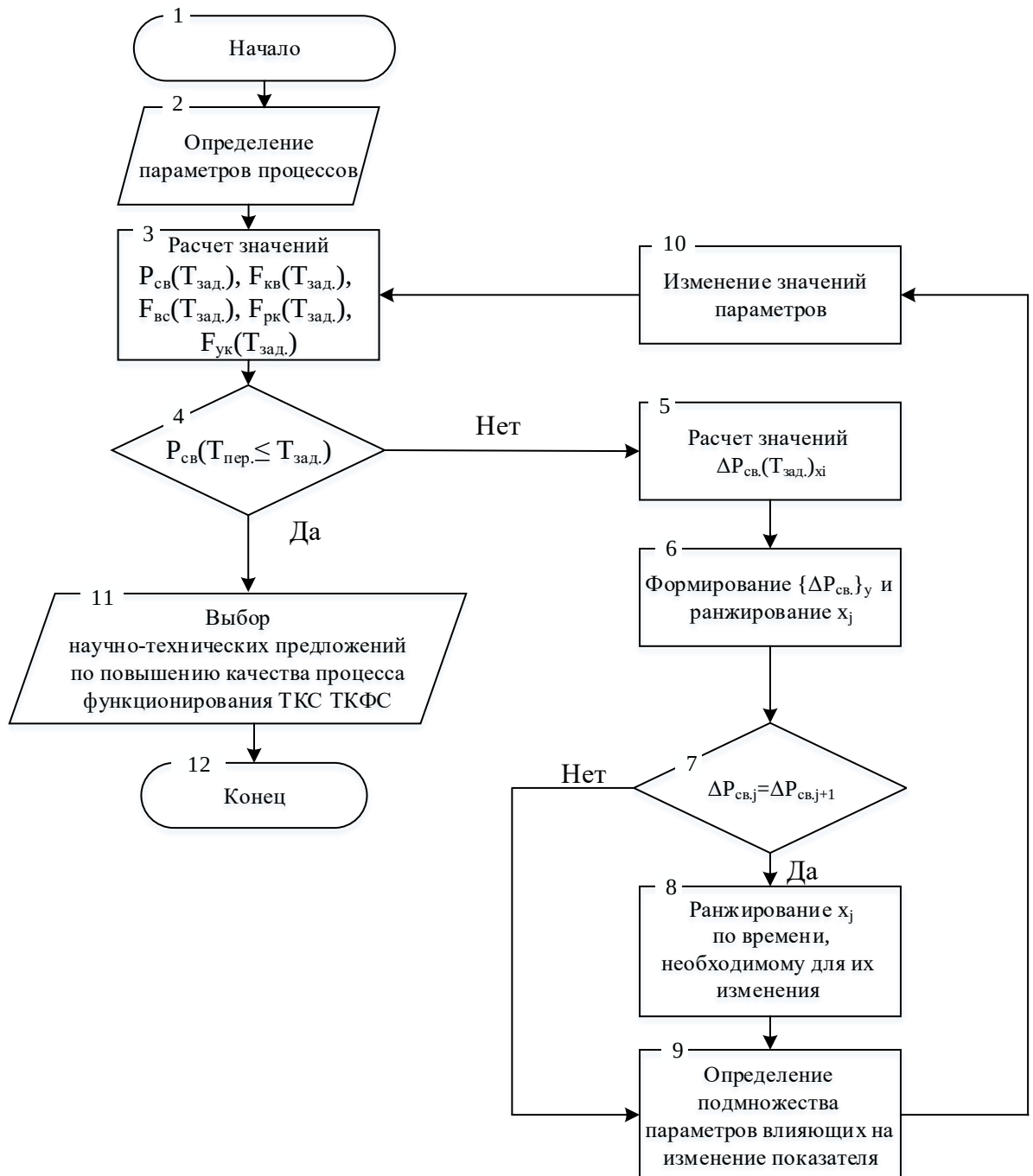


Рисунок 3.8 – Порядок выбора рациональных мероприятий по повышению качества процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Пример расчёта по методике.

Исходные данные, используемые для расчёта, приведены в таблице 3.2 диссертации.

Ввиду того, что в ТКС циркулируют данные различных категорий срочности, рассмотрим случай для 1-ой категории срочности для: $P_{св} = 0,999$ при $T_{зад} \leq 1$, (с).

Результатом расчётов является семейство функций приращений обобщенного показателя вероятности своевременной доставки данных.

Частными показателями процесса реализации информационного дестабилизирующего фактора на ТКС ТКФС ОАО «РЖД» техническими средствами являются (рисунок 3.9):

- $x_1 - \overline{t_{b1}}$ – среднее время анализа сетевого трафика;
- $x_2 - \overline{t_{d1}}$ – среднее время вскрытия сети и определения узлов коммутации;
- $x_3 - \overline{t_{e1}}$ – среднее время формирования бот-сети;
- $x_4 - P_1$ – вероятность подключения к элементу ТКС.

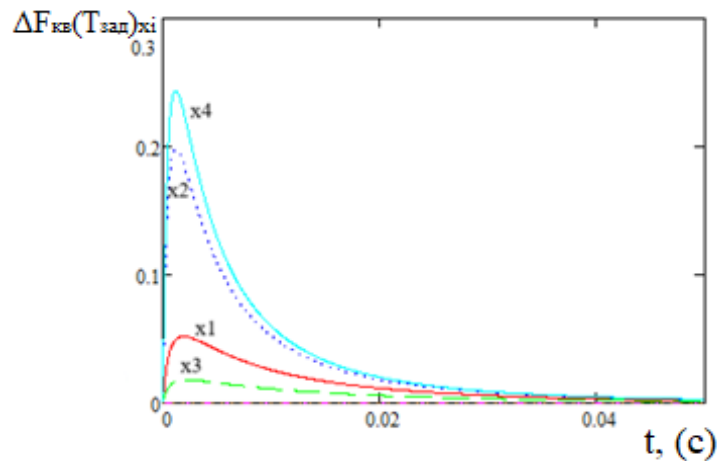


Рисунок 3.9 – Графики зависимостей $\Delta F_{кв}(1/T_{зад})_{xi}$

По заданным исходным данным при выполнении расчёта для $T_{зад} = 1$ (с), элементами вектора $\{\Delta F_{кв}\}_y$ являются значения приращений $\{\Delta F_{кв}\}_y = \{1,998 \cdot 10^{-8}; 1,971 \cdot 10^{-8}; 1,945 \cdot 10^{-8}; 1,819 \cdot 10^{-8}\}$, которым соответствуют параметры x_j : $x_1 = \overline{t_{d1}}$; $x_2 = P_1$; $x_3 = \overline{t_{b1}}$; $x_4 = \overline{t_{e1}}$.

Частными показателями процесса восстановления информационного обмена являются (рисунок 3.10):

- $x_5 - \overline{t_{c6}}$ – среднее время проверки команды на истинность;
- $x_6 - \overline{t_{e6}}$ – среднее время реализации выбранных мер восстановления;
- $x_7 - \overline{t_{a6}}$ – определения команды управления телекоммуникационным оборудованием;
- $x_8 - \overline{t_{d6}}$ – среднее время выбора мер восстановления;
- $x_9 - \overline{t_{b6}}$ – среднее время исполнения принятой команды;
- $x_{10} - P_9$ – вероятность принятия команды на исполнение.

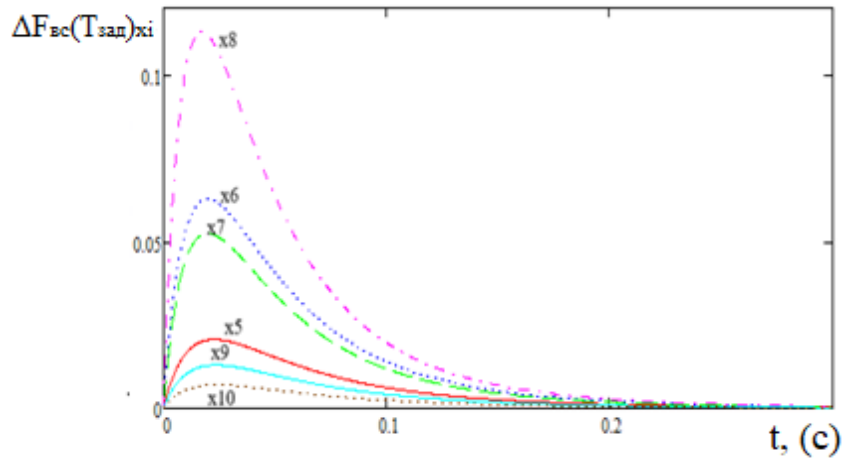


Рисунок 3.10 – Графики зависимостей $\Delta F_{вс}(1/T_{зад})_{xi}$

По заданным исходным данным при выполнении расчёта для $T_{зад} = 1(с)$, элементами вектора $\{\Delta F_{вс}\}_y$ являются значения приращений $\{\Delta F_{вс}\}_y = \{1,683 \cdot 10^{-6}; 1,292 \cdot 10^{-6}; 1,084 \cdot 10^{-6}; 1,007 \cdot 10^{-6}; 8,609 \cdot 10^{-7}; 7,994 \cdot 10^{-7}\}$, которым соответствуют параметры x_j : $x_1 = \overline{t_{d6}}$; $x_2 = \overline{t_{a6}}$; $x_3 = \overline{t_{e6}}$; $x_4 = \overline{t_{b6}}$; $x_5 = \overline{t_{c6}}$; $x_6 = P_9$.

Частными показателями процесса передачи данных по беспроводным каналам связи ТКС ТКФС ОАО «РЖД» являются (рисунок 3.11):

- $x_{11} - P_3$ – вероятность приёма сигнала КВС;
- $x_{12} - P_4$ – вероятность приёма сигналов УПС, КПС, Дистанции;
- $x_{13} - P_5$ – вероятность приёма базовой станцией сигналов УПС, КПС и Дистанции после регулирования мощности;
- $x_{14} - \overline{t_{d3}}$ – среднее время восстановления;

– $x_{15} - P_6$ – вероятность реализации дестабилизирующего процесса.

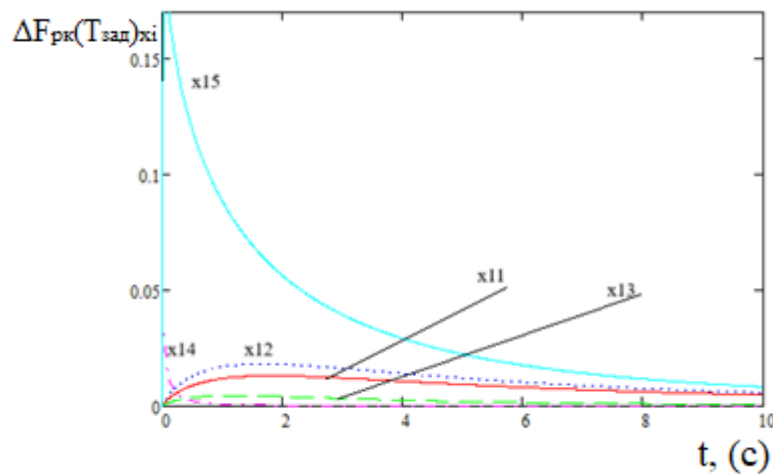


Рисунок 3.11 – Графики зависимостей $\Delta F_{\text{рк}}(1/T_{\text{зад}})_{xi}$

По заданным исходным данным при выполнении расчёта для $T_{\text{зад}} = 1(\text{с})$, элементами вектора $\{\Delta F_{\text{рк}}\}_y$ являются значения приращений $\{\Delta F_{\text{рк}}\}_y = \{0,088; 0,017; 0,012; 4,47 \cdot 10^{-3}; 8,682 \cdot 10^{-4}\}$, которым соответствуют параметры x_j : $x_1 = P_6$; $x_2 = P_4$; $x_3 = P_3$; $x_4 = P_5$; $x_5 = \overline{t_{d3}}$.

Узел коммутации R2 функционирует в условиях физических деструктивных факторов, частными показателями процесса функционирования УК являются (рисунок 3.12):

- $x_{16} - \lambda_{k2}$ – интенсивность поступающих пакетов на входы УК 2;
- $x_{17} - K_{\text{н.ук2}}$ – ёмкость накопителя УК 2;
- $x_{18} - C_{\text{ук2}}^2$ – среднеквадратичный коэффициент вариации времени передачи (обслуживания) пакета данных УК 2;
- $x_{19} - \overline{t_{d4}}$ – среднее время восстановления УК 2;
- $x_{20} - K_{\text{г.ук2}}$ – коэффициент готовности УК 2.

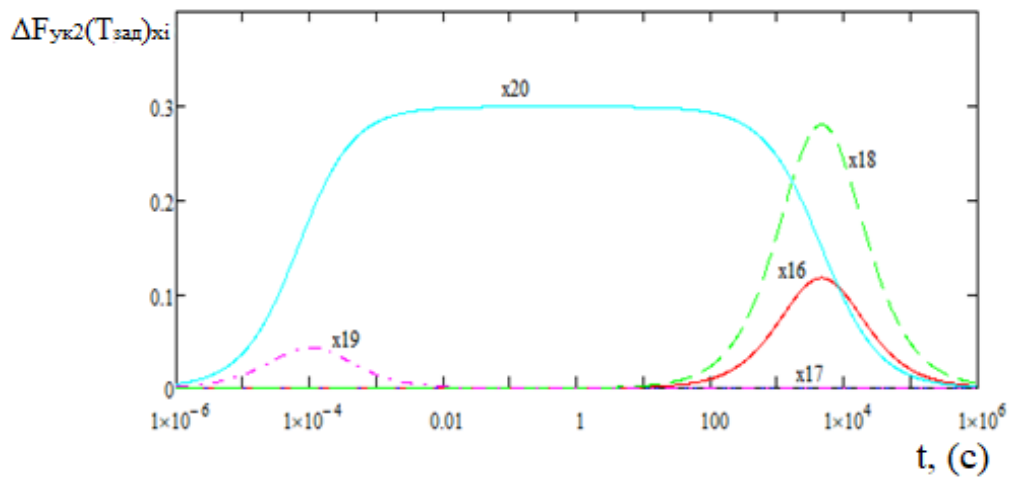


Рисунок 3.12 – Графики зависимостей $\Delta F_{ук2}(1/T_{зад})_{xi}$

По заданным исходным данным при выполнении расчёта для $T_{зад} = 1(с)$, элементами вектора $\{\Delta F_{ук2}\}_y$ являются значения приращений $\{\Delta F_{ук2}\}_y = \{0,299; 2,42 \cdot 10^{-4}; 1,011 \cdot 10^{-4}; 1,713 \cdot 10^{-5}; 5,588 \cdot 10^{-8}\}$, которым соответствуют параметры x_j : $x_1 = K_{г.ук2}$; $x_2 = C^2_{ук2}$; $x_3 = \lambda_{k2}$; $x_4 = \overline{t_{d4}}$; $x_5 = K_{н.ук2}$.

Узел коммутации R3 функционирует в условиях информационных дестабилизирующих факторах, в этом случае частными показателями процесса функционирования УК являются (рисунок 3.13):

- $x_{21} - \lambda_{k3}$ – интенсивность поступающих пакетов на входы УК 3;
- $x_{22} - K_{н.ук3}$ – ёмкость накопителя УК 3;
- $x_{23} - C^2_{ук3}$ – среднеквадратичный коэффициент вариации времени передачи (обслуживания) пакета данных УК 3;
- $x_{24} - P_{оо}$ – вероятность реализации информационного дестабилизирующего процесса.

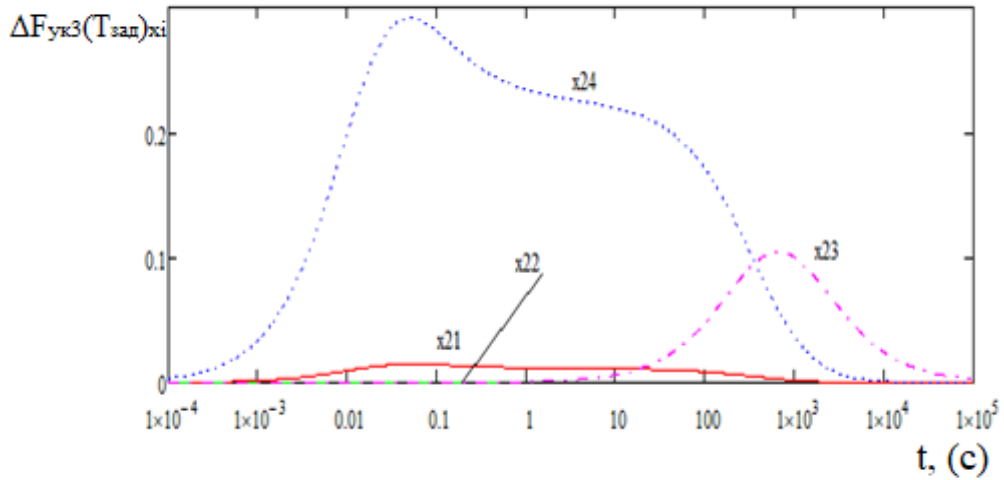


Рисунок 3.13 – Графики зависимостей $\Delta F_{ук3}(1/T_{зад})_{xi}$

По заданным исходным данным при выполнении расчёта для $T_{зад} = 1(с)$, элементами вектора $\{\Delta F_{ук3}\}_y$ являются значения приращений $\{\Delta F_{ук3}\}_y = \{0,234; 0,012; 7,172 \cdot 10^{-4}; -1,058 \cdot 10^{-3}\}$, которым соответствуют параметры x_j : $x_1 = P_{00}$; $x_2 = \lambda_{k3}$; $x_3 = K_{н.ук3}$; $x_4 = C^2_{ук3}$.

При выполнении расчёта для $T_{зад} = 1(с)$ элементами вектора $\{\Delta F_i\}_y$ являются значения приращений $\{\Delta F_i\}_y = \{0,299; 0,234; 0,088; 0,017; 0,012; 0,012; 4,47 \cdot 10^{-3}; 8,682 \cdot 10^{-4}; 7,172 \cdot 10^{-4}; 2,42 \cdot 10^{-4}; 1,011 \cdot 10^{-4}; 1,713 \cdot 10^{-5}; 1,683 \cdot 10^{-6}; 1,292 \cdot 10^{-6}; 1,084 \cdot 10^{-6}; 1,007 \cdot 10^{-6}; 8,609 \cdot 10^{-7}; 7,994 \cdot 10^{-7}; 5,588 \cdot 10^{-8}; 1,998 \cdot 10^{-8}; 1,971 \cdot 10^{-8}; 1,945 \cdot 10^{-8}; 1,819 \cdot 10^{-8}; -1,058 \cdot 10^{-3}\}$, которым соответствуют параметры x_{ij} : $x_{201} = K_{г.ук2}$; $x_{242} = P_{00}$; $x_{153} = P_6$; $x_{124} = P_4$; $x_{215} = \lambda_{k3}$; $x_{116} = P_3$; $x_{137} = P_5$; $x_{148} = \overline{t_{d3}}$; $x_{229} = K_{н.ук3}$; $x_{1810} = C^2_{ук2}$; $x_{1611} = \lambda_{k2}$; $x_{1912} = \overline{t_{d4}}$; $x_{813} = \overline{t_{d6}}$; $x_{714} = \overline{t_{a6}}$; $x_{615} = \overline{t_{e6}}$; $x_{916} = \overline{t_{b6}}$; $x_{517} = \overline{t_{c6}}$; $x_{1018} = P_9$; $x_{1719} = K_{н.ук2}$; $x_{220} = \overline{t_{d1}}$; $x_{421} = P_1$; $x_{122} = \overline{t_{b1}}$; $x_{323} = \overline{t_{e1}}$; $x_{2324} = C^2_{ук3}$.

Из результатов решения следует, что наиболее целесообразным направлением достижения вероятности своевременной доставки данных, согласно требованиям нормативных документов [31], т.е. $\overline{T_{пер}} \leq T_{зад}$ при $P_{св} = 0,999$, является снижение доступности к УК, увеличение времени реализации

дестабилизирующих факторов, а также организация выделенной ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

При изменении требований и/или условий функционирования ТКС КФС, вектор $\{\Delta F_{ij}\}_y$ изменится и его элементам будет соответствовать другой порядок параметров x_j .

На основе указанной методики можно определить основные направления по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Разработанная методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в указанных условиях подтверждает, что текущее время доставки данных не соответствует требованиям руководящих документов [31]. Разработка научно-технических предложений, позволит существенно повысить качество процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

3.4 Оценка и анализ качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов

Результаты, полученные с использованием предложенной методики оценки качества процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, показывают, что показатель вероятности своевременной доставки данных для двух категорий срочности, не соответствует требованиям руководящих документов [31].

Графики функций $F_i(t)$, представленные на рисунках 3.6 и 3.7, наглядно демонстрируют влияние стороннего трафика на качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Поскольку в сети одновременно циркулирует трафик вспомогательных служб, общая нагрузка на инфраструктуру значительно возрастает, что приводит к существенному росту задержек при передаче данных. Это негативно отражается на своевременности доставки легитимного

управляющего трафика, предназначенного для взаимодействия с объектами ТКФС. Команды управления могут поступать с недопустимыми временными задержками, что, в свою очередь, снижает оперативность принятия решений, нарушает предсказуемость поведения системы и создаёт пробелы в её функционировании.

Кроме того, демонстрируемые на графиках рисунка 3.6 зависимости $F_i(t)$ позволяют оценить влияние параметров P_1 , P_{00} , K_r . В случае увеличения значений параметров P_1 , P_{00} и снижения коэффициента готовности УК, такие условия значительно повышают возможности для создания деструктивных факторов.

При $\overline{T_{кв}} = 7$ с., $\overline{T_{вс}} = 45$ с. и различных значениях коэффициентов готовности узлов связи $K_{г.1-6} = 0,7$ и $K_{г.1-6} = 0,99$ получим, что: $\overline{T_{пер}} = 63000 > T_{зад} = 1$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,999$ для 1-ой категории срочности, $\overline{T_{пер}} = 41000 > T_{зад} = 5$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,99$ для 2-ой категории срочности, $\overline{T_{пер}} = 40 > T_{зад} = 1$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,999$ для 1-ой категории срочности, $\overline{T_{пер}} = 38 > T_{зад} = 5$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,99$ для 2-ой категории срочности.

Представленные на графиках рисунка 3.7 зависимости $F_i(t)$ позволяют оценить влияние параметров P_9 , $\overline{t_{d4}}$. Очевидно, что снижение значений параметров P_9 , при увеличении времени восстановления УК, значительно увеличивает время доведения информации.

При $\overline{T_{кв}} = 1300$ с., $\overline{T_{вс}} = 6$ с. и различных значениях коэффициентов готовности узлов связи $K_{г.1-6} = 0,7$ и $K_{г.1-6} = 0,99$ получим, что: $\overline{T_{пер}} = 63000 > T_{зад} = 1$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,999$ для 1-ой категории срочности, $\overline{T_{пер}} = 41000 > T_{зад} = 5$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,99$ для 2-ой категории срочности, $\overline{T_{пер}} = 8 > T_{зад} = 1$ с. с заданной вероятностью своевременной доставки данных $P_{св} = 0,999$ для 1-ой категории срочности, $\overline{T_{пер}} = 8,6 > T_{зад} = 5$ с. с заданной

вероятностью своевременной доставки данных $P_{\text{св}} = 0,99$ для 2-ой категории срочности.

Существующие способы обеспечения качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», не обеспечивают требуемый уровень вероятности своевременной доставки данных ТКС объектам ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Учитывая критическую роль ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в обеспечении бесперебойного и безопасного управления подвижными объектами, возникает необходимость выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

Это послужило включению в методику оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» этапов методики выбора рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» (блоки 13-17).

3.5 Выводы по главе 3

1. Разработанная методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов позволила количественно подтвердить ключевые закономерности и явления, выявленные на этапе моделирования частных и комплексной модели. Методика позволяет не только количественно оценивать текущее состояние сети, но и формирует основу для оперативного управления и принятия решений по повышению её устойчивости. Впервые в состав методики включены этапы выбора рациональных мероприятий, что обеспечивает переход от пассивной оценки к возможности управления её функционированием.

2. На основе анализа существующих подходов обоснован и выбран основной показатель качества – вероятность своевременной доставки данных: $P_{\text{св}}\{\overline{T_{\text{пер}}} \leq T_{\text{зад}}\}$. Этот показатель напрямую отражает способность ТКС выполнять свою системообразующую функцию ТКФС – обеспечение доставки данных объектам управления. Проведённая оценка подтвердила: использование стандартных

средств мониторинга не обеспечивает требуемый уровень качества функционирования – при $\overline{T_{\text{кв}}} = 7$ с. и $\overline{T_{\text{кв}}} = 45$ с. время передачи данных превышает заданный предел в десятки тысяч раз ($\overline{T_{\text{пер}}} = 63000$ с. при $T_{\text{зад}} = 1$ с.), что делает необходимым циклическое обновление и адаптацию механизмов мониторинга и диагностики.

3. Управление ТКС возможно только при наличии вероятностно-временных характеристик состояний ТКС в условиях совокупного влияния дестабилизирующих факторов. Это предполагает интеграцию СОВ, ЕСМА и самой ТКС в единую информационно-управляющую петлю, где данные о состоянии сети используются в режиме реального времени для выявления аномалий, оценки качества функционирования и инициации мер восстановления до возникновения недопустимых задержек передаваемого трафика. Методика показала, что сокращение времени восстановления позволит снизить задержку передачи данных, что подтверждает критическую роль оперативности реакции на воздействия.

4. Разработанная методика подтвердила, что передача трафика высоких категорий срочности по несегментированной сети с присутствием стороннего трафика делает невозможным выполнение нормативных требований по своевременности доставки данных. Циркуляция стороннего трафика в ТКС ТКФС приводит к росту нагрузки, увеличению самоподобия трафика и многократному увеличению задержек. Это напрямую подтверждает выводы, полученные при моделировании функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД»: передача легитимного трафика при совместной передаче сторонних данных недопустима для ТКФС. Это обуславливает организацию структуры логически выделенной ТКС с передачей однородного трафика фиксированного объёма не просто желательной, а обязательной мерой для обеспечения прогнозирования трафика. Такой подход позволит обеспечить однородность трафика по структуре и объёму, регулярность и предсказуемость его поступления, существенное ослабление или практическое устранение самоподобных свойств.

5. Анализ показал, что вероятность своевременной доставки данных высоких категорий срочности зависит от двух факторов:

- снижения доступности сетевых элементов;
- снижения времени восстановления информационного обмена, за счёт оперативного обнаружения изменений трафика.

Это обосновывает необходимость внедрения структуры программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений (СМИППР), способной в реальном времени выявлять аномалии, оценивать качество функционирования и инициировать механизмы восстановления информационного обмена до возникновения недопустимых задержек.

ГЛАВА 4 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

4.1 Основные пути повышения качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»

Результаты моделирования и оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов однозначно показали: существующая организация архитектуры и место ТКС ТКФС, основанная на использовании общетехнологической инфраструктуры и стандартных средств мониторинга и администрирования, не обеспечивает выполнение требований по своевременности передачи управляющих команд.

Результаты моделирования выявили следующие закономерности:

- дестабилизирующие факторы обладают синергетическим эффектом, увеличивая время восстановления;
- наиболее вероятным информационным дестабилизирующим фактором является «Отказ в обслуживании», направленным на блокирование сетевых элементов;
- самоподобный трафик вызывает «пачечное» поступление данных, что приводит к переполнению буферов узлов коммутации и росту вероятности потери пакетов;
- физические дестабилизирующие процессы на сетевые элементы резко снижают коэффициент готовности узлов коммутации, что приводит к кратному увеличению времени передачи данных;

Разработанная методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов подтвердила:

- вероятность своевременной доставки данных не соответствует нормативным требованиям, даже при высокой надёжности оборудования;
- циркуляция стороннего трафика в ТКС ТКФС увеличивает задержки в несколько раз;
- сокращение времени восстановления до 6 – 14 секунд позволяет сохранить приемлемые задержки, что подтверждает критическую роль оперативной реакции на инциденты.

Проведённый анализ выявил два ключевых направления повышения качества функционирования:

1. Обеспечение предсказуемости трафика за счёт устранения влияния стороннего трафика и самоподобных свойств.
2. Снижение уязвимости к дестабилизирующим факторам за счёт увеличения времени реализации дестабилизирующих условий через оперативное управление ТКС.

В соответствии с этим были сформулированы научно-технические предложения, направленные на реализацию указанных направлений:

- организация структуры выделенной ТКС ТКФС на базе технологии MPLS L3VPN, обеспечивающей изоляцию передачи управляющих команд объектов ТКФС;
- внедрение структуры программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений, обеспечивающей оперативное обнаружение аномалий и позволяющей прогнозировать состояние ТКС.

4.2 Вариант организации структуры выделенной телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»

Ввиду того, что ТКС ТКФС ОАО «РЖД» включена в состав сети ОбТН ОАО «РЖД», и использует общие каналы и телекоммуникационное оборудование для обеспечения передачи данных. Такая архитектура создаёт риски снижения качества

обслуживания критически важного трафика управления подвижными объектами из-за конкуренции за пропускную способность с некритичными потоками данных.

В целях повышения качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» представляется целесообразным реализовать организационно-технические мероприятия, направленные на создание выделенной ТКС ТКФС [79,103]. Выделенная инфраструктура позволит:

- изолировать трафик управления от сторонних потоков;
- обеспечить гарантированные параметры задержки, джиттера и вероятности доставки;
- упростить мониторинг состояния ТКС.

Такой подход соответствует принципам построения транспортных киберфизических систем и рекомендациям нормативных документов в области защиты критически важных информационных систем железнодорожного транспорта [38,104].

При проектировании выделенной телекоммуникационной инфраструктуры для ТКФС ОАО «РЖД» могут быть рассмотрены следующие основные архитектурные подходы:

1. Физически выделенная сеть. Развёртывание полностью независимой оптоволоконной/радиоинфраструктуры не использующей ресурсы общетехнологической сети. Самым главным преимуществом данной архитектуры является максимальная изоляция трафика. Однако использование такого подхода содержит в себе недостатки: высокая стоимость, длительные сроки развёртывания, сложность обслуживания особенно на протяжённых участках железнодорожного полотна.

2. Логическая изоляция на базе VLAN [105]. Использование виртуальных LAN-сегментов поверх существующей инфраструктуры. Главным недостатком выступает отсутствие сквозной маршрутизации при перемещении подвижного объекта между зонами обслуживания.

3. Создание логически выделенной сети поверх существующей с использованием технологии MPLS L3VPN [79,103,106,107]. Использование

технологии Multiprotocol Label Switching Layer 3 Virtual Private Network (MPLS L3VPN) поверх существующей ТКС ТКФС ОАО «РЖД» с выделением виртуальных маршрутов передачи данных для подвижных объектов ТКФС ОАО «РЖД». Данное решение содержит следующие преимущества:

- поддержка мобильности: при перемещении подвижного состава между узлами связи маршрут передачи данных динамически изменяется;
- гарантированное качество обслуживания (QoS) [24];
- выделение каждого вида трафика в отдельные VRF (Virtual Routing and Forwarding) [103,106,107], команды управления помещаются в отдельный VRF, а телеметрия, голос и видео помещаются в других VRF с собственными правилами маршрутизации;
- затруднение сбора данных о ТКС и информации, циркулирующей в ней [108,109];
- использует уже развёрнутую инфраструктуру общетехнологической сети без необходимости прокладки новых линий.

Учитывая, что маршрут передачи данных постоянно меняется из-за перемещения подвижных объектов, технология MPLS L3VPN является наиболее рациональным решением.

Маршрутные таблицы различных классов трафика (например, управляющего и мультимедийного) разнесены по отдельным VRF. Между ними отсутствует пересечение на уровне маршрутизации, что исключает влияние перегрузки одного класса трафика на другой. В результате даже при высокой нагрузке со стороны не критичных потоков данных, передача команд управления полностью изолирована и не конкурирует за сетевой ресурс.

В отличие от классической IP-маршрутизации, где путь выбирается динамически и может меняться в зависимости от состояния сети, в MPLS используются Label-Switched Paths (LSP) [103,106,107] — предопределённые маршруты передачи данных.

Для трафика команд формируется выделенный LSP с применением протокола RSVP-TE (Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering) [110]. На

каждом транзитном узле вдоль этого пути резервируется маршрут передачи данных, что гарантирует стабильную пропускную способность независимо от общей загрузки сети. Такой подход обеспечивает предсказуемую задержку, минимальный джиттер и отсутствие потерь данных, что критично для передачи команд управления подвижным составом.

Каждый MPLS-пакет содержит поле EXP (Experimental bits), в которое копируется информация о приоритете из поля DSCP IP-заголовка. Управляющий трафик маркируется как Expedited Forwarding (EF) и получает строгий приоритет обработки на всех узлах коммутации. Остальной служебный трафик обслуживается с более низким приоритетом. Это гарантирует, что управляющие команды всегда обслуживаются первыми.

В рамках реализации выделенной ТКС ТКФС ОАО «РЖД» на базе технологии MPLS L3VPN используется двухуровневая модель коммутации по меткам. В данной архитектуре выделяются два типа узлов:

- LER (Label Edge Router) — пограничные маршрутизаторы, выполняющие функции Ingress (вход) и Egress (выход). Они обрабатывают как пакеты данных, так и MPLS-метки;
- LSR (Label Switching Router) — транзитные узлы, работающие исключительно с MPLS-метками без анализа пакетов данных.

При передаче трафика ТКФС применяется стек из двух меток:

- внешняя (транспортная) метка — определяет путь следования пакета по Label-Switched Path (LSP) и управляется протоколами RSVP-TE или LDP;
- внутренняя (VPN) метка — указывает на конкретный VRF и обеспечивает логическую изоляцию трафика различных видов.

На основе существующей топологии фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД» предложена реализация выделенной сети с использованием технологии MPLS L3VPN (рисунок 4.1).

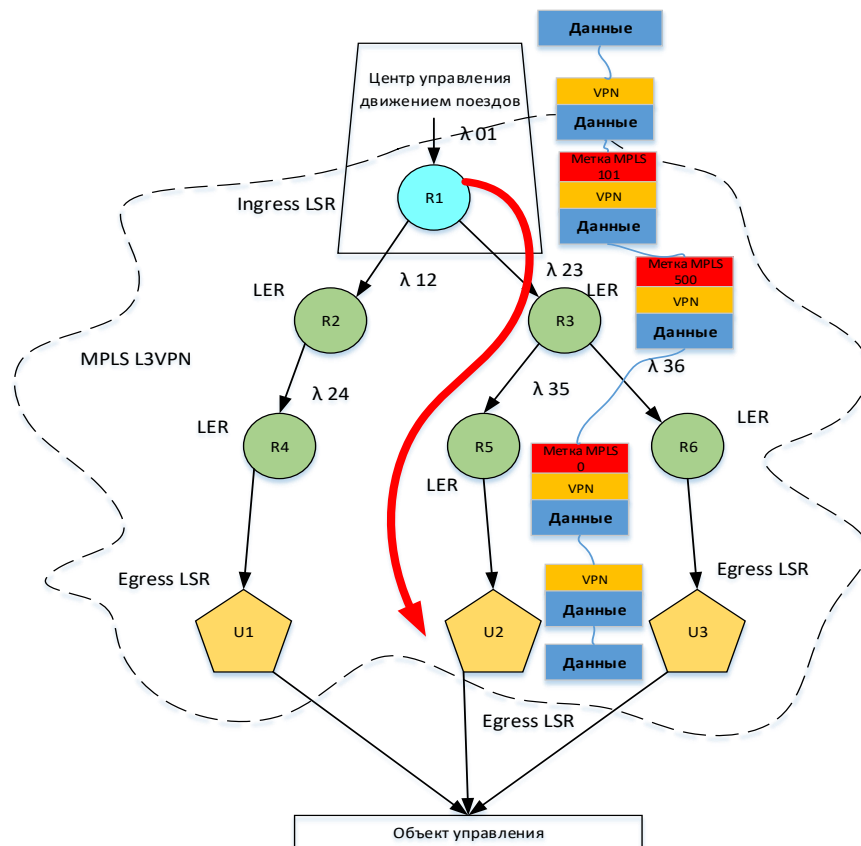


Рисунок 4.1 – Вариант организации структуры выделенной сети с использованием технологии MPLS L3VPN для фрагмента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

При передаче команд управления подвижными объектами ТКФС через УК: R1, R3, R5 и БС U2 применяется маркировка MPLS в соответствии с архитектурой MPLS L3VPN. Узел R1 выполняет функции Ingress LER: он принимает пакет и определяет его принадлежность к VRF ТКФС на основе адреса назначения. Затем добавляется внутренняя метка VPN, указывающая на конкретный объект назначения. Следом добавляется внешняя транспортная метка предопределенного маршрута Label-Switched Path (LSP).

Узлы R3 и R5 работают как транзитные LSR: на каждом из них выполняется замена внешней MPLS-метки в соответствии с заранее определенным LSP. Внутренняя VPN-метка при этом сохраняется без изменений, что позволяет сохранить привязку к конкретному маршруту и осуществить приоритизацию трафика.

На узле R5 выполняется операция Penultimate Hop Popping (PHP) и реализуется функция Egress LER: внешняя метка удаляется, а по внутренней метке в таблице VRF определяется конечный получатель пакета. Внутренняя метка также удаляется и пакет поступает на базовую станцию U2, которая доставляет его подвижному объекту.

В случае нарушения передачи данных по маршруту запускается механизм быстрого восстановления Fast Reroute (FRR). Он основан на концепции предварительного вычисления резервных путей. FRR заранее определяет резервные маршруты для передачи трафика, что позволяет мгновенно изменить маршрут передачи. Для построения резервных маршрутов узлы коммутации обмениваются информацией о своих соседних узлах коммутации через протокол OSPF. Для каждого возможного пути передачи данных вычисляется основной путь, одновременно вычисляется резервный путь, для которого метки MPLS L3VPN и соответствующий VRF уже определены.

В результате выполнения организационно-технических мероприятий по созданию выделенной ТКС ТКФС ОАО «РЖД» на базе технологии MPLS L3VPN, время передачи данных существенно снижается (рисунок 4.2). В условиях эксплуатации общетехнологической сети среднее время передачи данных составило $\overline{T}_{\text{пер}} = 27, (\text{с})$. После организации логически выделенной сети время передачи данных сократилось до $\overline{T}_{\text{пер}} = 10,5, (\text{с})$.

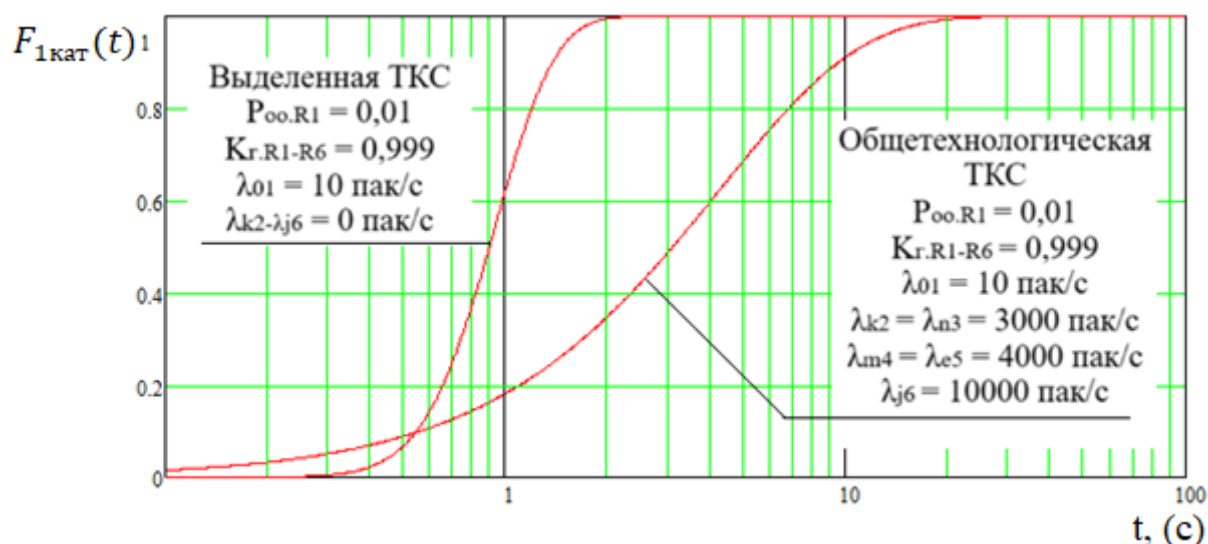


Рисунок 4.2 – График функции распределения времени передачи данных по выделенной и общетехнологической ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

Данный подход обеспечивает не только логическую изоляцию трафика, но и затрудняет сбор информации о сети связи: топология передачи трафика скрыта, а маршрут передачи данных постоянно изменяется при перемещении подвижного состава.

Несмотря на то, что организация выделенной сети на базе технологии MPLS L3VPN позволила существенно сократить время передачи данных, достигнутое значение вероятности своевременной доставки данных по-прежнему не соответствует требованиям руководящих документов [31]. Как показал анализ, проведённый в пункте 3 диссертации, для обеспечения требуемого уровня качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в дестабилизирующих факторов, необходима разработка и внедрению программного модуля СМППР.

4.3 Структура программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений по управлению телекоммуникационной сетью транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»

В рамках ОАО «РЖД» реализована ЕСМА [6], представляющая собой комплексную платформу для управления телекоммуникационной инфраструктурой, включающую ключевые модули. TPS Manager используется для консолидации и обработки информации о событиях, GUI Manager позволяет визуализировать состояние оборудования на векторной карте, а также модуль стыковки с системами управления сетями производителей (СУСП), обеспечивающий интеграцию с различными системами мониторинга [6].

Основное назначение ЕСМА – предоставление оператору полной картины происходящих событий с возможностью просмотра конкретных участков сети. Система позволяет отслеживать состояние технических средств, протоколировать действия персонала и обеспечивать установленный порядок выполнения административных действий [6].

Однако ЕСМА имеет существенные ограничения, делающие её недостаточной для управления ТКС ТКФС:

1. Высокая степень ручного труда – значительное количество операций по устранению аварий выполняется вручную, что требует от операторов высокой профессиональной квалификации [6].

2. Отсутствие автономности принятия решений – при невозможности самостоятельного принятия решения оператор вынужден обращаться за помощью на уровень центра управления сетью, что дополнительно увеличивает время реакции на события [6].

3. Ограничение возможности поддержки принятия решений – существующая система основана на представлении результатов статистической обработки инцидентов и не позволяет осуществлять оперативное управление ТКС.

В этих условиях возникает необходимость во внедрении структуры программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений, который будет дополнять функционал ЕСМА возможностями без полноценной замены инфраструктуры (рисунок 4.3):

- автоматизированного анализа параметров функционирования ТКС ТКФС;
- прогнозирования аномалий в режиме реального времени;
- формирования обоснованных рекомендаций по управлению ТКС;
- оперативного наблюдения за состоянием ТКС ТКФС непосредственно в интерфейсе ЕСМА.

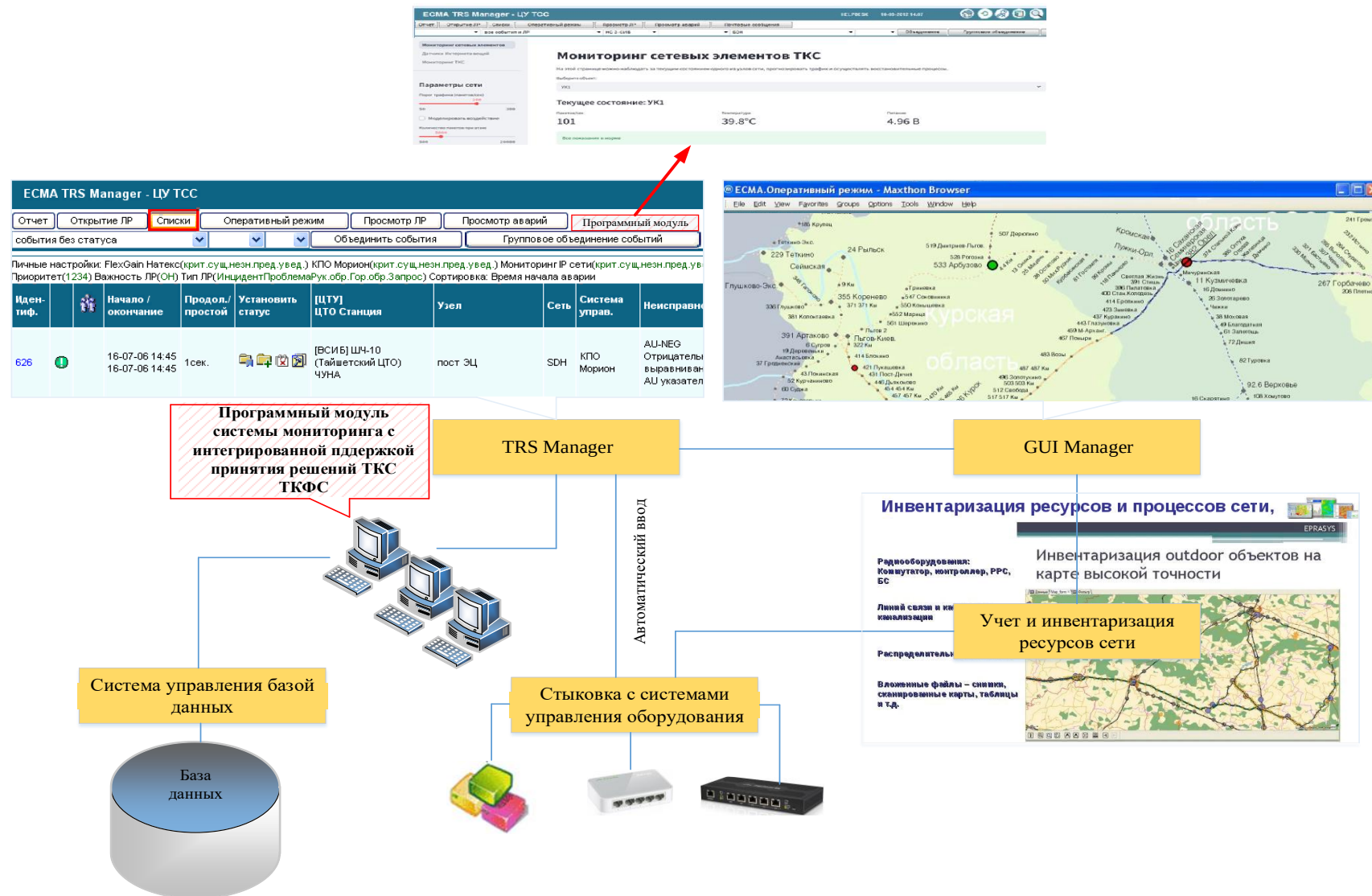


Рисунок 4.3 – Функционально-структурная схема ЕСМА со встроенным программным модулем

Повысить качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» можно только при совместном взаимодействии СОВ, СУИБ и ЕСМА. С целью восстановления информационного обмена передачи данных в ТКС ТКФС ОАО «РЖД» предлагается внедрение структуры модуля математического и программного обеспечения СМППР управления ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

В её состав входят (рисунок 4.4) [111]:

- цифровой двойник (ЦД) [112], обеспечивающий прогностическое моделирование состояния сети;
- интеллектуальные агенты (ИА) [113], размещённые на сетевых элементах и способные к автономному противодействию дестабилизирующим процессам и прогнозированию трафика;
- датчики Интернета вещей [114], осуществляющие сбор параметров физического и технического состояния оборудования.

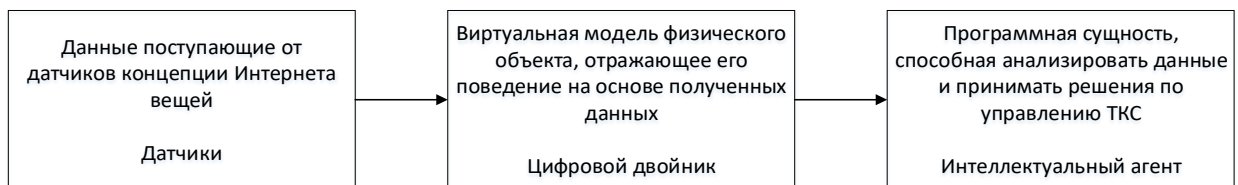


Рисунок 4.4 – Элементы системы мониторинга, связанной с подсистемой принятия решений

Конкретизируя данный термин ЦД – это виртуальная модель физического объекта, которая отражает её текущее состояние в реальном времени, обладает видом и свойствами реального объекта.

Важнейшим отличием ЦД от математической модели является возможность учитывать прошлые состояния объекта, текущее состояние, а также обеспечивать прогнозирование будущих состояний. Как было сказано ранее, возможные дестабилизирующие факторы приводят к нарушению процесса передачи данных, а следствием этого является нарушение главного технологического процесса – перевозочного.

Интеллектуальный агент – автономный программный компонент, на основе мониторинга и анализа данных способный осуществлять принятие решений в сети.

Агенты могут динамически перенастраивать маршруты в сети, в зависимости от загрузки и приоритетов трафика.

Данные от датчиков и сетевых интерфейсов поступают в локальные интеллектуальные агенты, которые на основе анализа в реальном времени параметров трафика и сетевых элементов инициируют меры по восстановлению функционирования ТКС, а также передают информацию в цифровой двойник для долгосрочного прогнозирования (рисунок 4.5). Такой подход обеспечивает повышение качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

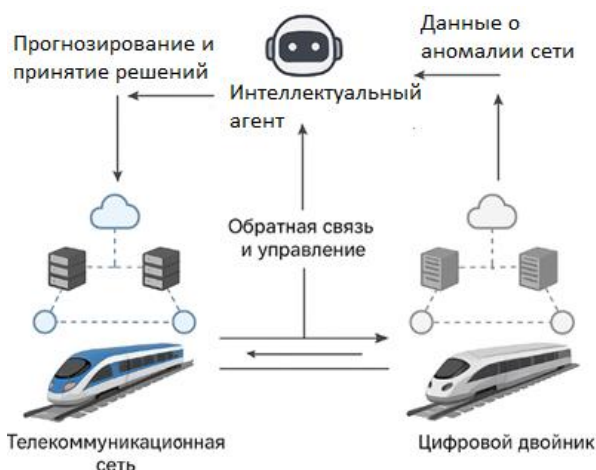


Рисунок 4.5 – Обобщенная структура взаимодействия цифрового двойника и интеллектуального агента ТКС ТКФС ОАО «РЖД»

В задачи ЦД входит:

- моделирование процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в реальном времени, учитывая возможные дестабилизирующие факторы;
- прогнозирование состояния ТКС на основе исторических и текущих данных.

Задачами ИА является:

- реализация децентрализованного принятия решений;
- автономное реагирование на деструктивные факторы;
- прогнозирование поступления трафика на сетевые элементы;
- анализ сетевых параметров и параметров сетевых элементов.

Датчики Интернета вещей предназначены для:

- сбора параметров функционирования узлов коммутации, таких как: температуры, вскрытия корпуса, энергопотребления. Изменение данных параметров свидетельствуют о признаках возможного физического вмешательства;
- данные с датчиков-сенсоров осуществляют сбор сетевой информации.

Общая структура модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений представлена на рисунке 4.6.

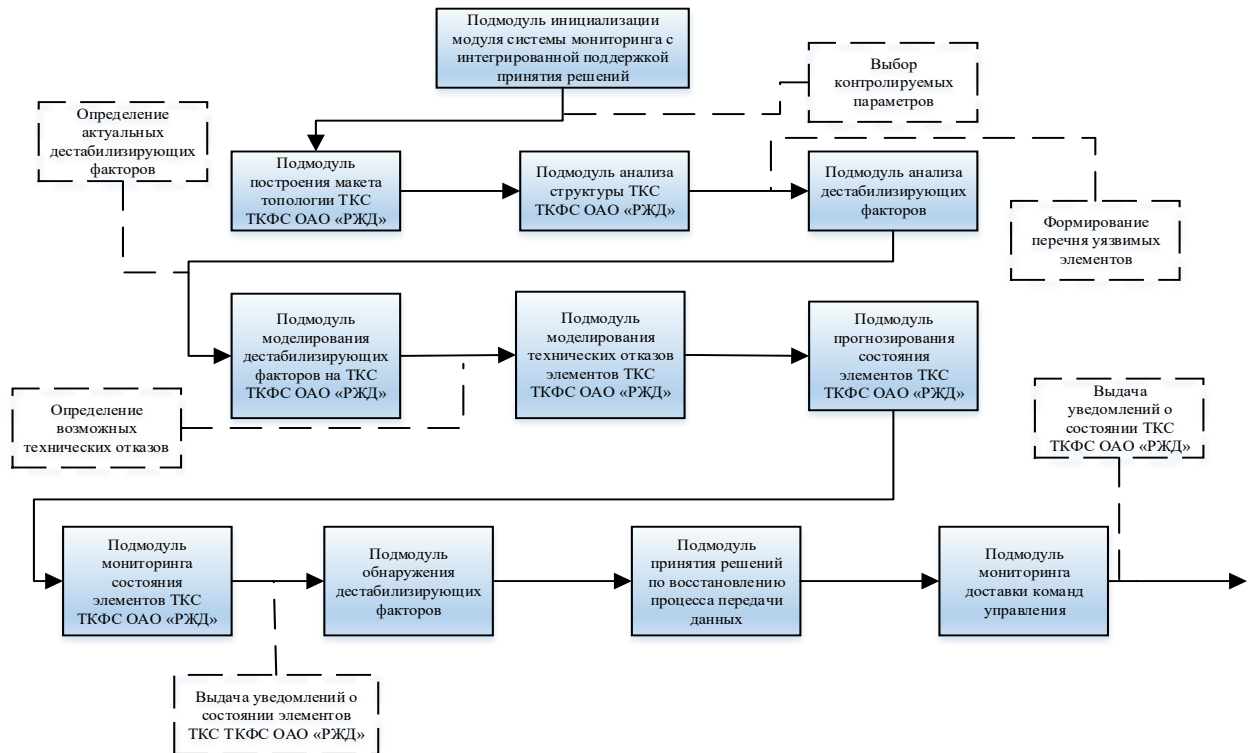


Рисунок 4.6 – Общая структура программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений

Внедрение программного модуля системы мониторинга и её интеграция в ЕСМА, позволит оператору ЕСМА в реальном времени наблюдать за состоянием ТКС ТКФС ОАО «РЖД» (рисунок 4.7).

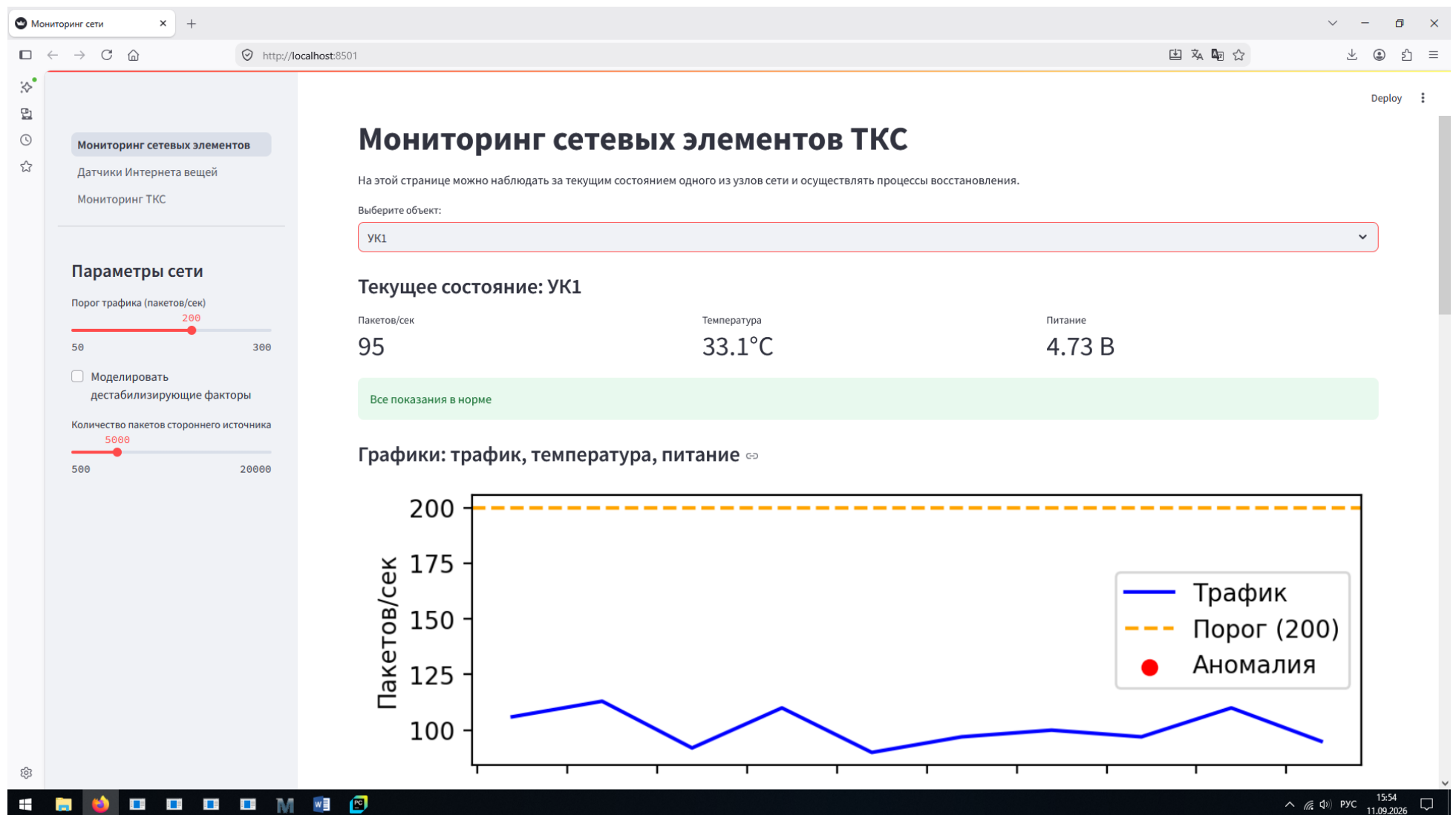


Рисунок 4.7 – Структура интерфейса программного модуля

Программный модуль системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений по управлению ТКС ТКФС ОАО «РЖД» обеспечивает выполнение следующих функций [111,115]:

- непрерывный мониторинг параметров функционирования сетевых элементов;
- имитационное моделирование сценариев реализации дестабилизирующих факторов;
- анализ временных характеристик доставки команд управления, включая расчёт вероятности своевременной доставки данных;
- автоматизированную реализацию процессов восстановления информационного обмена, включая смену маршрута передачи данных;
- динамическую визуализацию топологии сети с цветовой индикацией состояния УК.

При разработке программного модуля системы мониторинга особое внимание должно быть уделено удобству и понятности интерфейса для операторов сети, что обеспечивает эффективное управление в условиях высокой нагрузки и необходимости быстрого реагирования на инциденты (рисунок 4.8). Интерфейс должен быть структурирован по функциональным разделам, каждый из которых отвечает за конкретный аспект мониторинга и управления.

Раздел мониторинга сетевых элементов (рисунки 4.8 – 4.9) обеспечивает комплексный контроль за состоянием инфраструктуры отдельных сетевых элементов ТКС ТКФС ОАО «РЖД». В данном разделе отображаются ключевые параметры функционирования выбранного сетевого элемента. Информация представлена в виде цифровых индикаторов, обеспечивающих оперативную оценку состояния оборудования (рисунок 4.8). Оператор способен в режиме реального времени осуществлять моделирование деструктивных процессов для проведения тестов функционирования ТКС ТКФС.

Изменение во времени важных параметров работы УК отображаются в виде графиков. Кроме того, отображается результат работы прогнозирования поступающего трафика, с использованием алгоритмов машинного обучения LSTM

(рисунок 4.9) [116]. Для удобства оператора информация о состоянии сетевых элементов заносится в журнал событий.

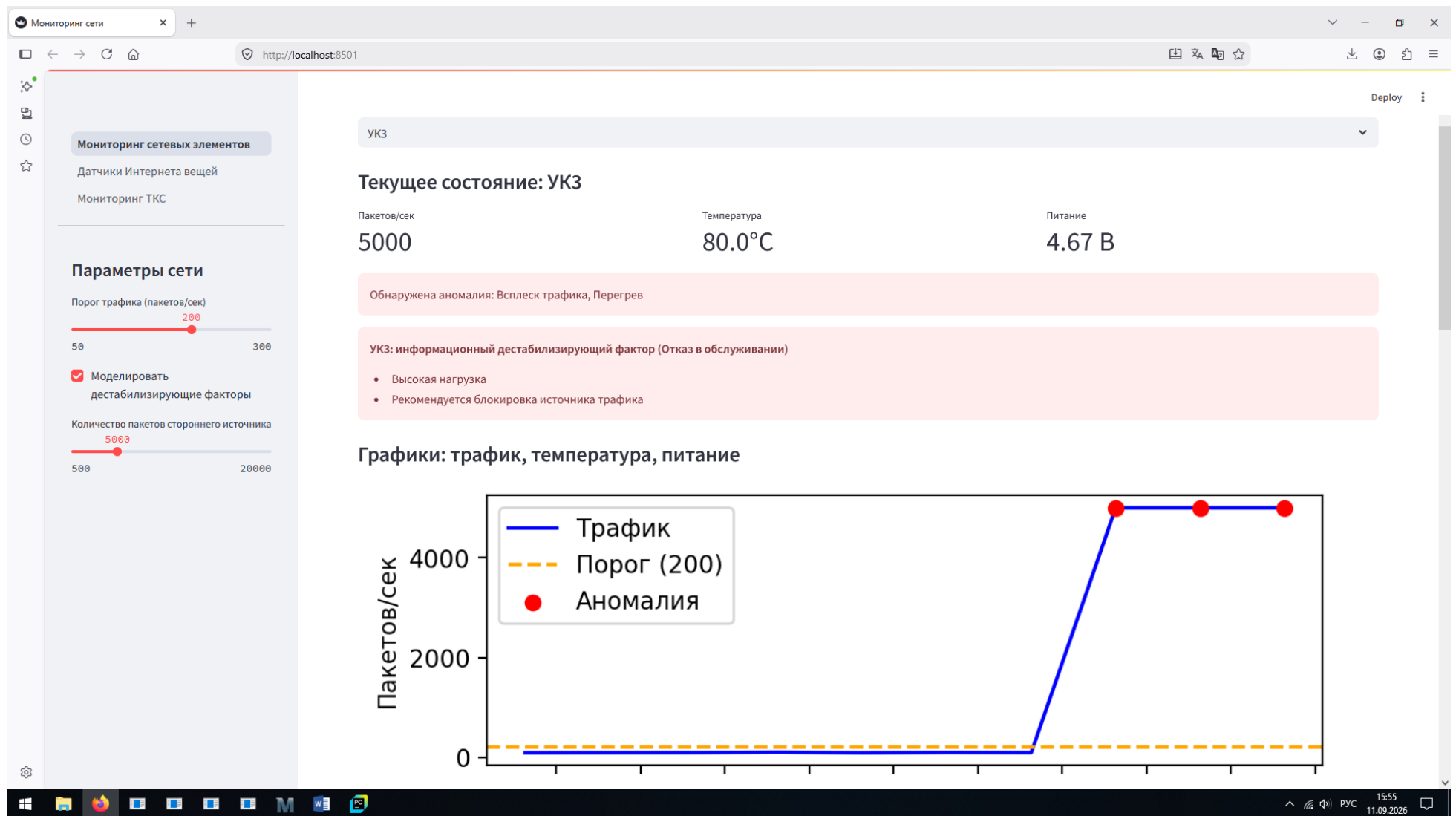


Рисунок 4.8 – Подраздел интерфейса программного модуля мониторинга сетевых элементов

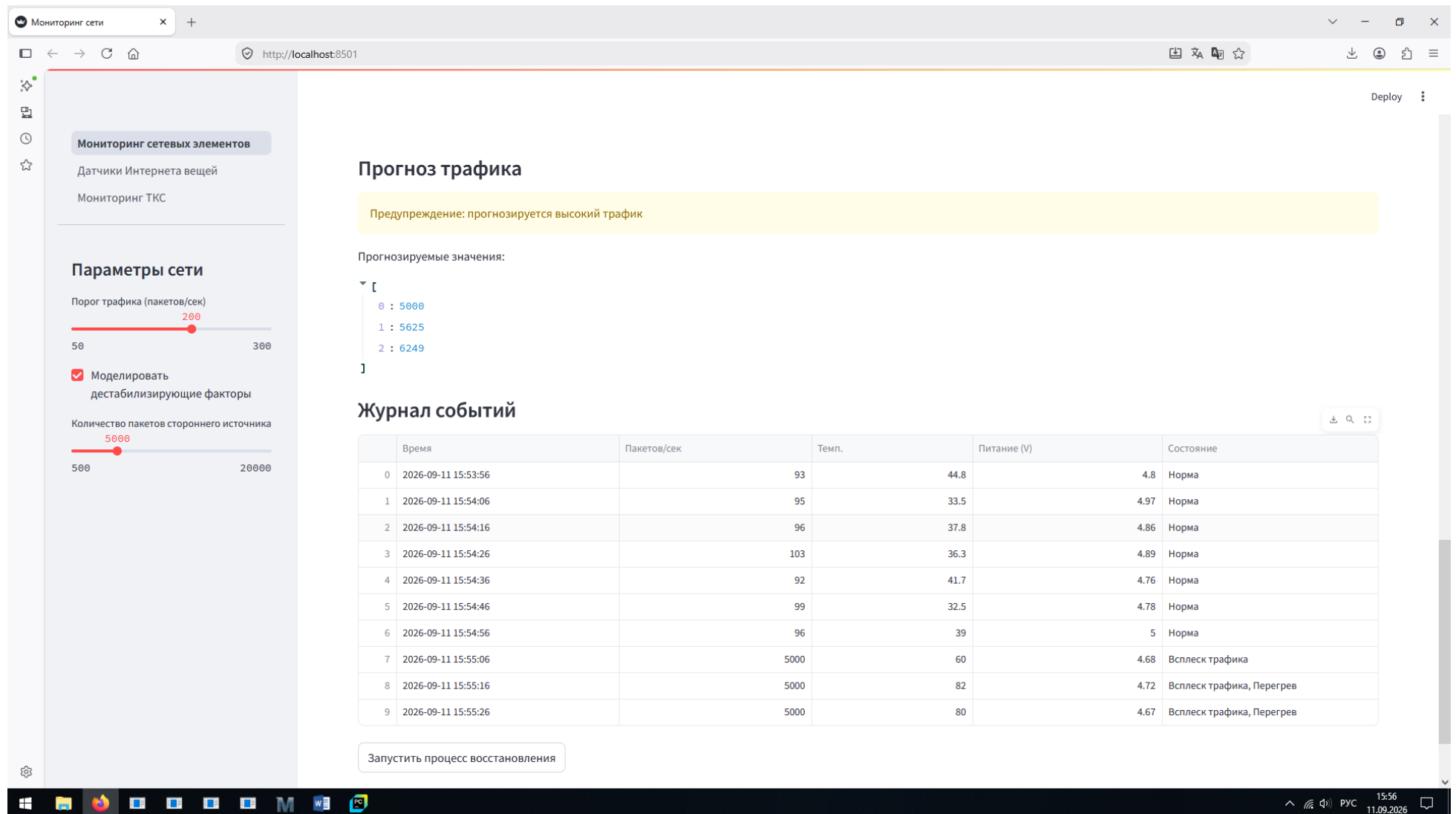


Рисунок 4.9 – Подраздел интерфейса прогнозирования поступающего трафика и журнала событий

Подраздел датчиков Интернета вещей (рисунки 4.10 – 4.11) является ключевым компонентом СМППР, обеспечивающим сбор и визуализацию физических параметров состояния сетевых элементов ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Данный подраздел позволяет оператору в реальном времени наблюдать за параметрами, полученными с датчиков, установленных на узлах коммутации. Показания отображаются в виде цифровых индикаторов, обеспечивающих оперативную оценку состояния оборудования (рисунок 4.10). Цветовая индикация позволяет мгновенно определить критические отклонения.

Данные, собираемые через этот подраздел, играют критическую роль в общей архитектуре СМППР. Интеллектуальные агенты используют показания датчиков для локального принятия решений. Цифровой двойник использует данные для прогнозирования состояния сети. Информация о физических параметрах интегрируется с сетевыми показателями для комплексного анализа внешних и внутренних негативных причин.

Особенно важно, что данные с датчиков Интернета вещей позволяют обнаруживать физические дестабилизирующие факторы, которые могут быть скрыты для традиционных систем мониторинга, но при этом указывают на возможные деструктивные явления. Обеспечивается раннее обнаружение аномалий, что позволяет снизить время восстановления на 40% – 60%. Данные используются системой прогнозирования, позволяя предотвращать инциденты до их возникновения. Таким образом, данный подраздел обеспечивает переход от пассивного наблюдения к активному мониторингу физических параметров, что является ключевым элементом в обеспечении функционирования ТКС ТКФС в условиях дестабилизирующих факторов.

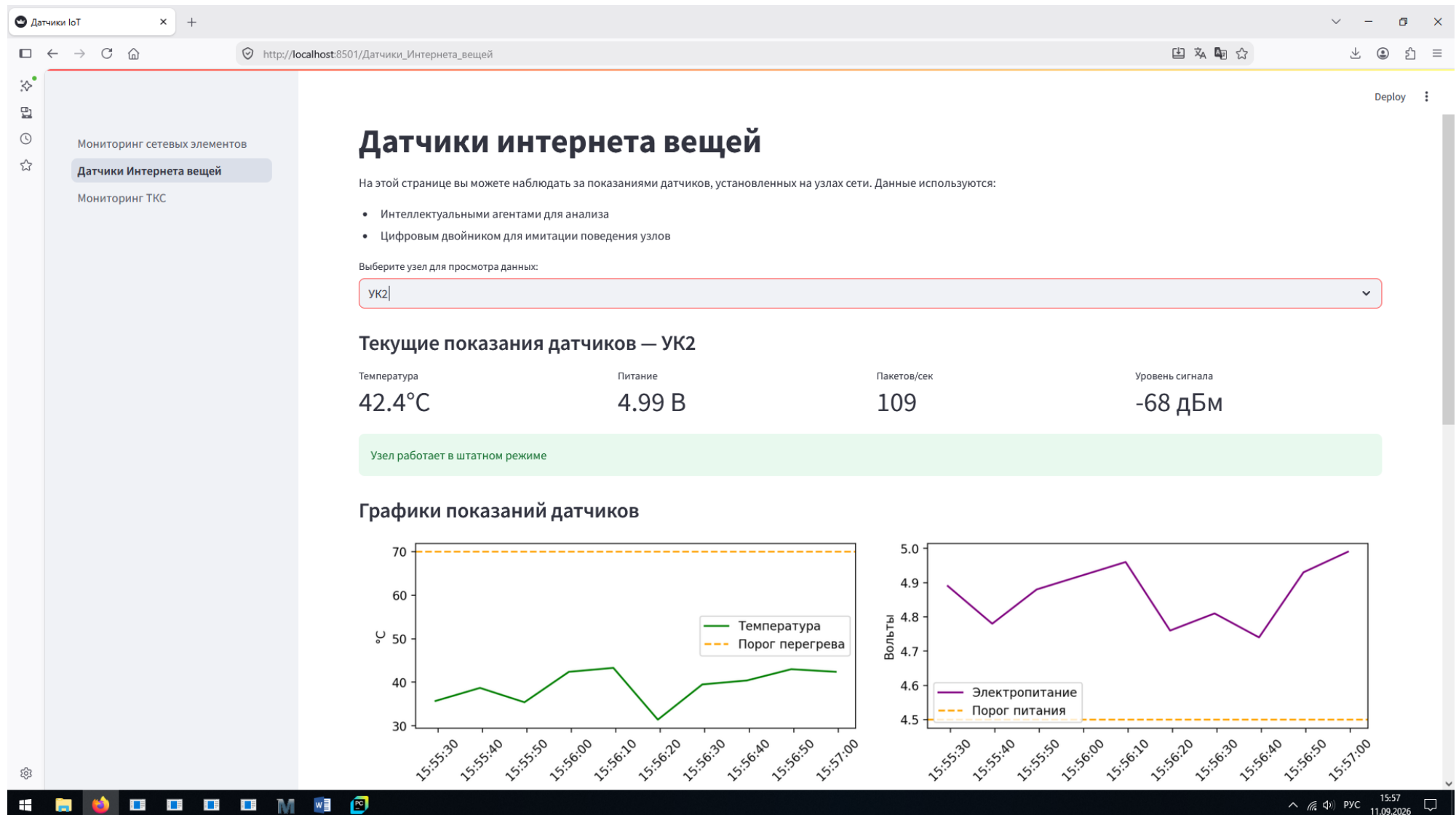


Рисунок 4.10 – Подраздел интерфейса программного модуля датчиков Интернета вещей

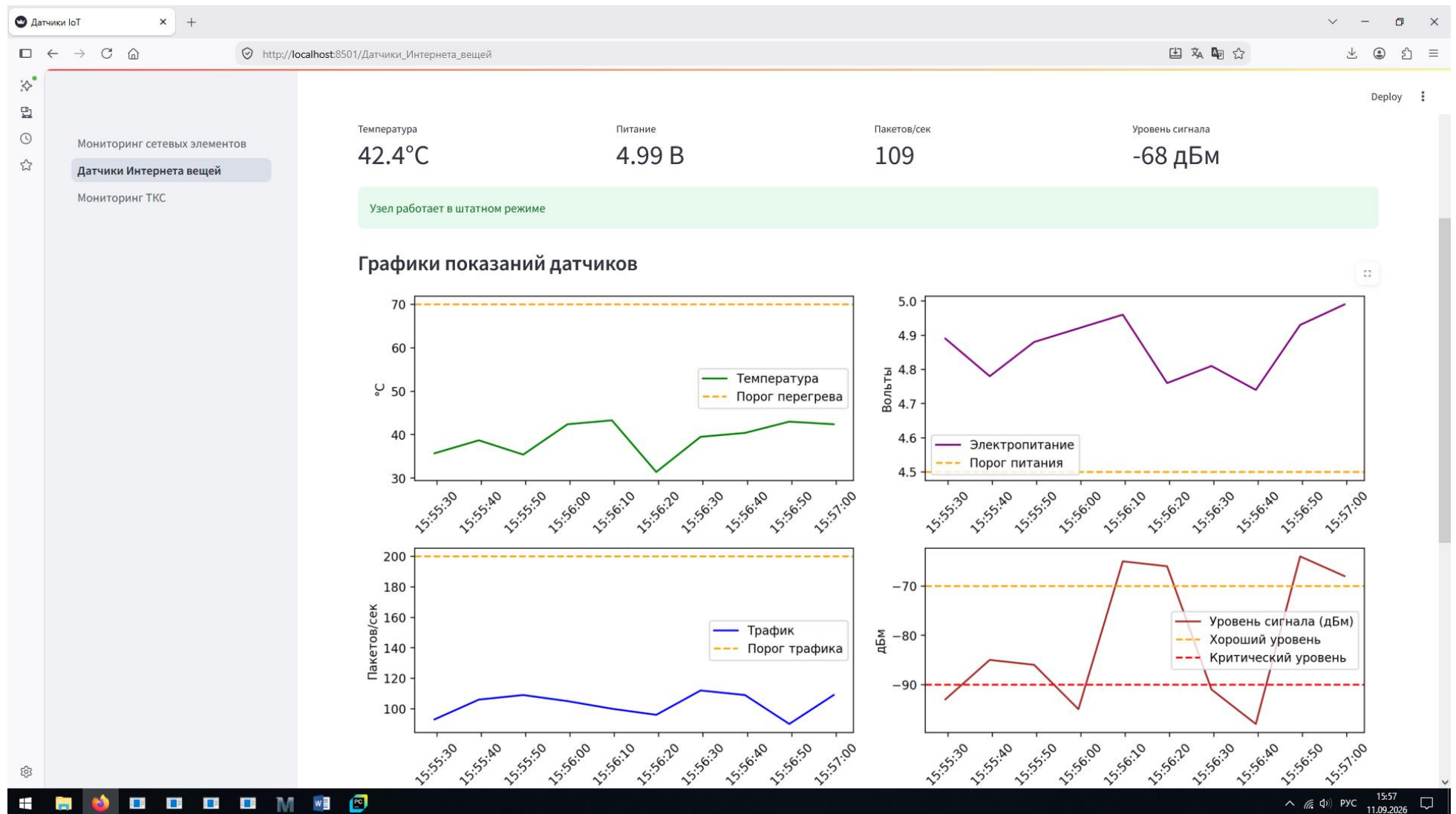


Рисунок 4.11 – Подраздел интерфейса отображения данных с датчиков

Подраздел мониторинга ТКС (рисунки 4.12 – 4.15) позволяет оператору наблюдать изменение времени доставки данных по маршрутам передачи различных категорий срочности. Он реализует функцию оценки соответствия времени доставки нормативным требованиям и выявляет дестабилизирующие факторы. Подраздел интегрирован с визуализацией топологии сети: при выборе маршрута на схеме топологии автоматически выделяются сетевые элементы, что позволяет оператору быстро локализовать источник задержки (рисунок 4.13).

Кроме того, оператор обладает возможностями по моделированию влияния факторов дестабилизации на время доставки команд управления объектам ТКФС (рисунок 4.14). Вся информация о времени доставки данных хранится в журнале событий (рисунок 4.15).

Данный подраздел обеспечивает прямую связь между качеством передачи данных и управлением ТКС. Фиксируется не только факт задержки передаваемых данных, но и выделяется причина. Это формирует основу для принятия решений – от ручного изменения маршрута передачи данных до запуска автоматизированных механизмов восстановления процесса передачи данных.

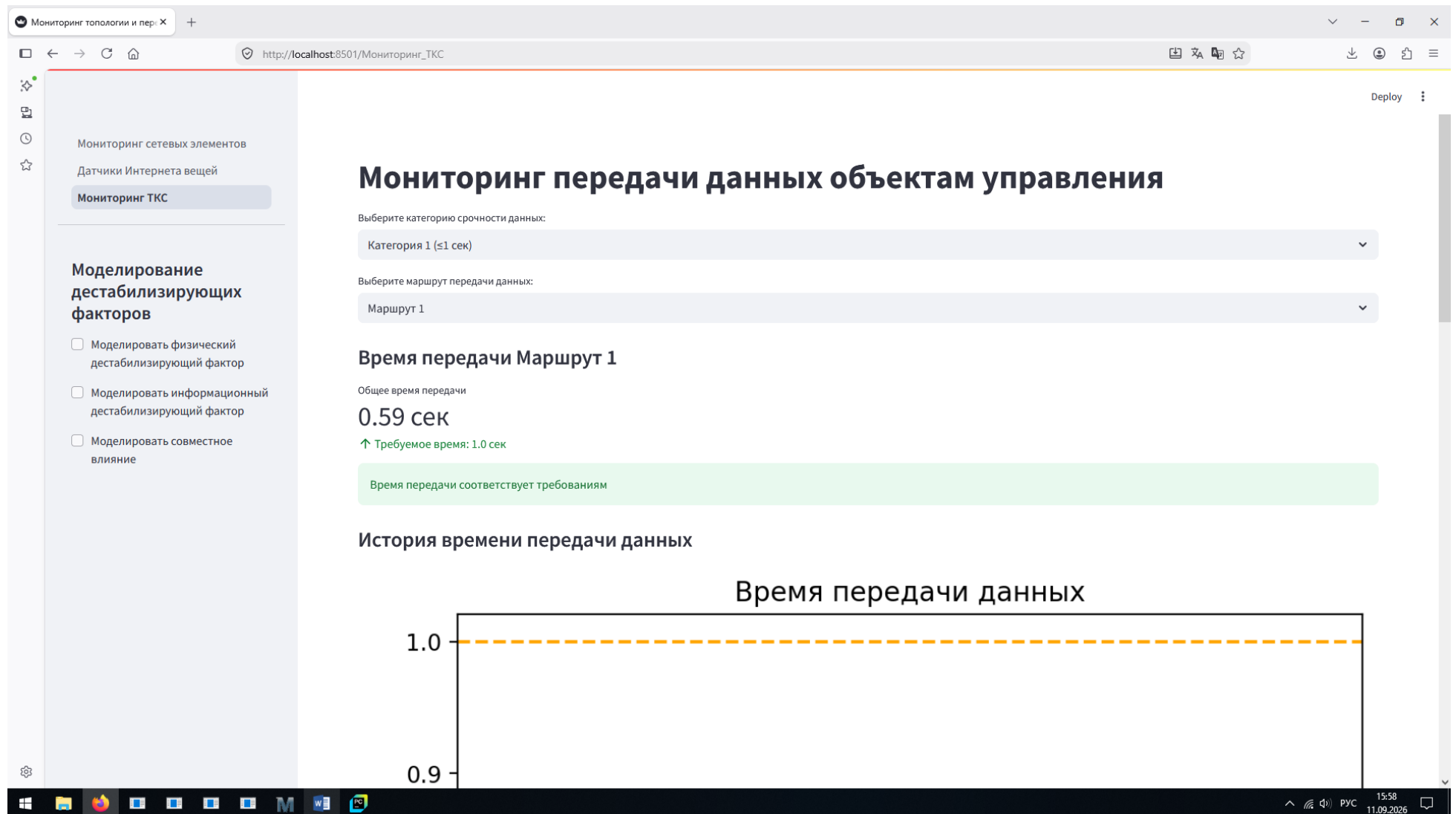


Рисунок 4.12 – Подраздел интерфейса программного модуля мониторинга ТКС

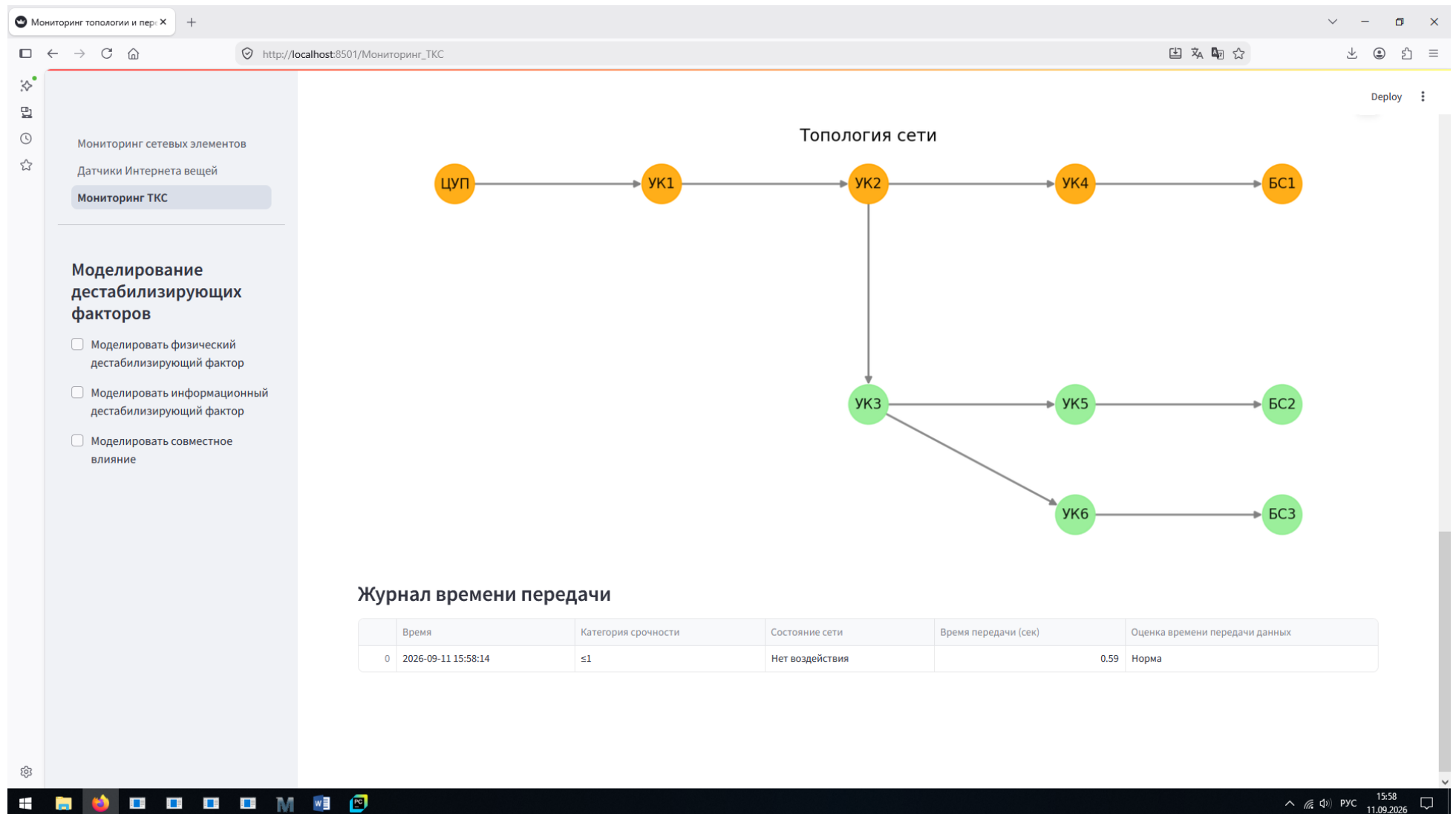


Рисунок 4.13 – Подраздел интерфейса программного модуля отображения топологии сети

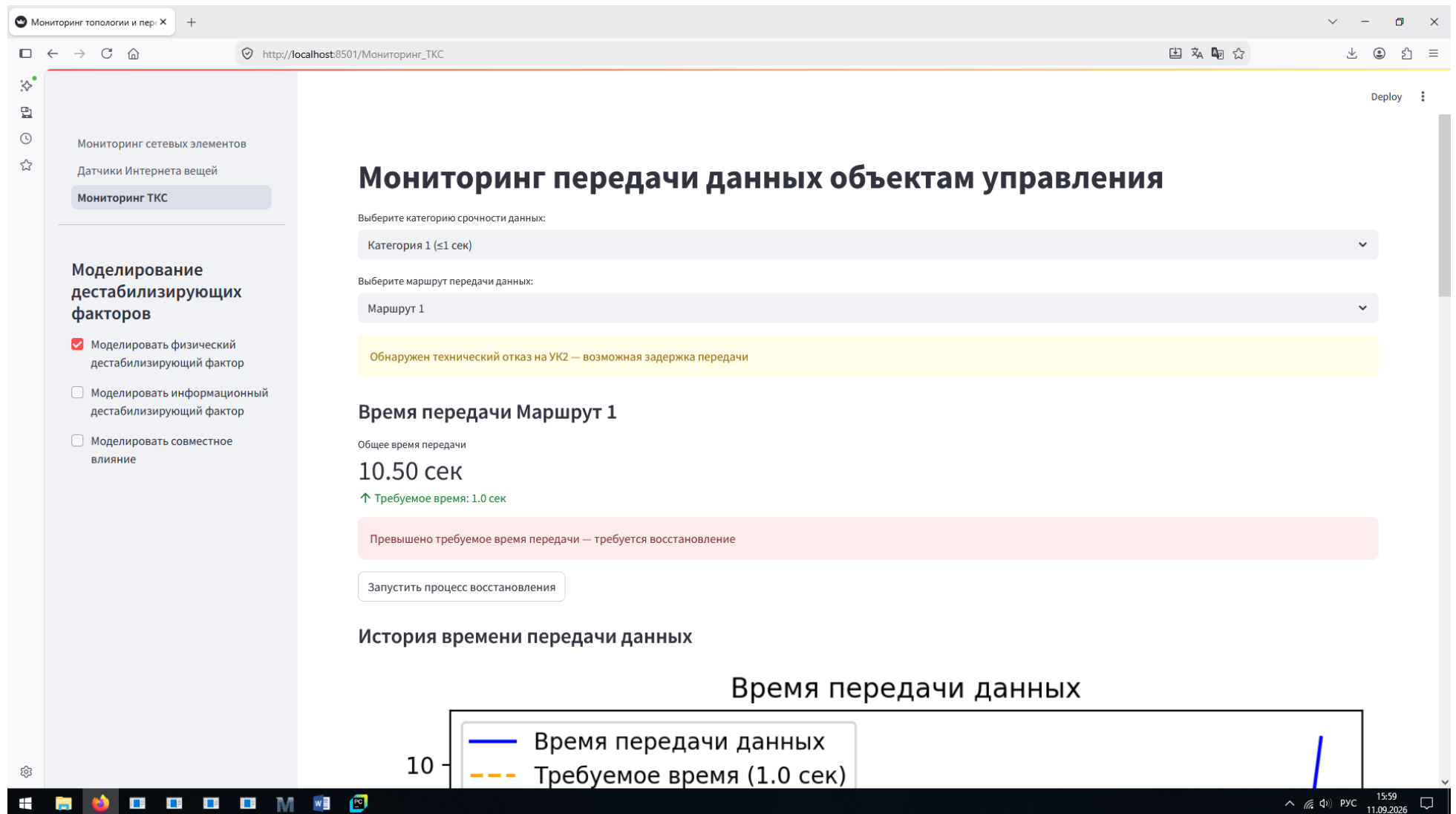


Рисунок 4.14 – Подраздел интерфейса программного модуля при реализации дестабилизирующих процессов

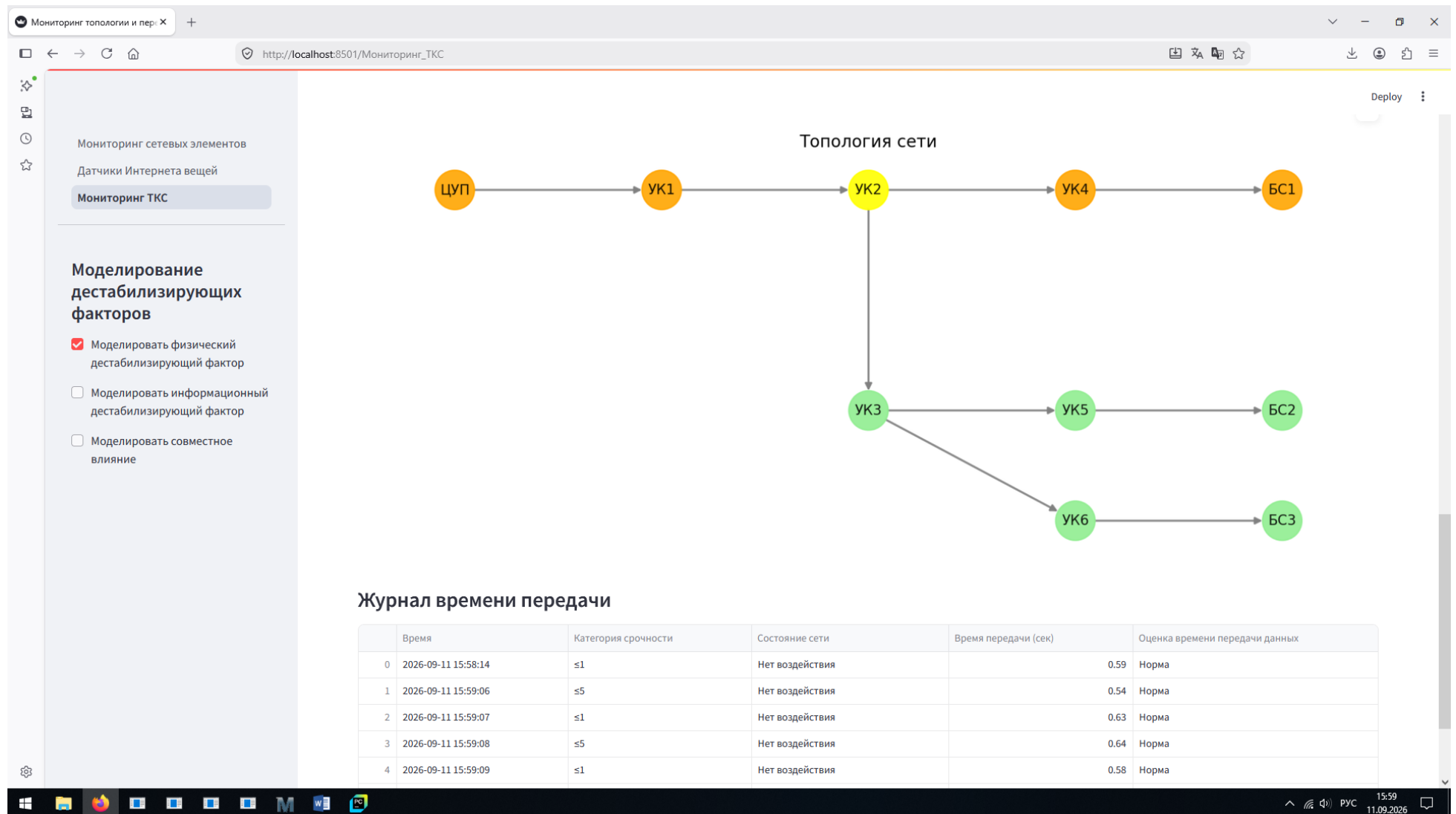


Рисунок 4.15 – Подраздел интерфейса журнала событий

Такой подход к разработке программного модуля позволил перейти от пассивного мониторинга ТКС к активному управлению ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Это способствует повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

Разработанный программный модуль СМППР, обеспечивает комплексный анализ качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Благодаря совместной реализации процессов непрерывного мониторинга, прогнозирования и автоматизированного принятия решений, модуль позволяет осуществлять оперативное и активное управление сетевой инфраструктурой даже в условиях внешних факторов. Таким образом, разработанное научно-техническое предложение представляет собой интеллектуальную систему управления ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в соответствии с нормативными требованиями ОАО «РЖД» [31].

Программный модуль СМППР обеспечивает оперативное обнаружение и частичную нейтрализацию дестабилизирующих факторов за счёт:

- анализа аномалий трафика в реальном времени;
- прогнозирования нагрузки с использованием методов машинного обучения;
- автоматизированного изменения маршрута передачи данных на резервные маршруты (FRR);
- интеграции данных от датчиков Интернета вещей для выявления признаков дестабилизирующих причин.

Однако одной системы мониторинга может быть недостаточно для обеспечения требуемого уровня качества функционирования. Необходимо внедрять профилактические, технические и организационные меры для противодействия. Основные направления включают в себя:

1. Использование дополнительного программно-аппаратного обеспечения. Необходимо использовать брандмауэры, реализованные в виде аппаратных или программных модулей. Они поддерживают динамическую фильтрацию данных и способны ограничивать скорость передаваемого трафика.

2. Фильтрация трафика. Использование межсетевых экранов позволяет осуществить фильтрацию трафика по IP-адресам, портам, протоколам и сигнатурам.

3. Устранение уязвимостей. Регулярное обновление операционных систем и ПО позволяет повысить эффективность работы системы и исключает эксплуатацию известных уязвимостей.

Таким образом, СМППР выступает, как интеллектуальное ядро активного управления ТКС ТКФС, но его эффективность многократно возрастает при интеграции его с классическими средствами обеспечения безопасности, что обеспечивает многоуровневую устойчивость критической телекоммуникационной инфраструктуры ЖДТ.

В результате выполнения организационно-технических мероприятий по внедрению программного модуля время передачи данных существенно снижается (рисунок 4.16). В условиях внедрения программного модуля системы мониторинга, связанной с подсистемой принятия решений сети среднее время передачи данных для 1-ой категории срочности составило $\overline{T}_{\text{пер}} = 8$ с., а для 2-ой категории срочности $\overline{T}_{\text{пер}} = 10$ с.

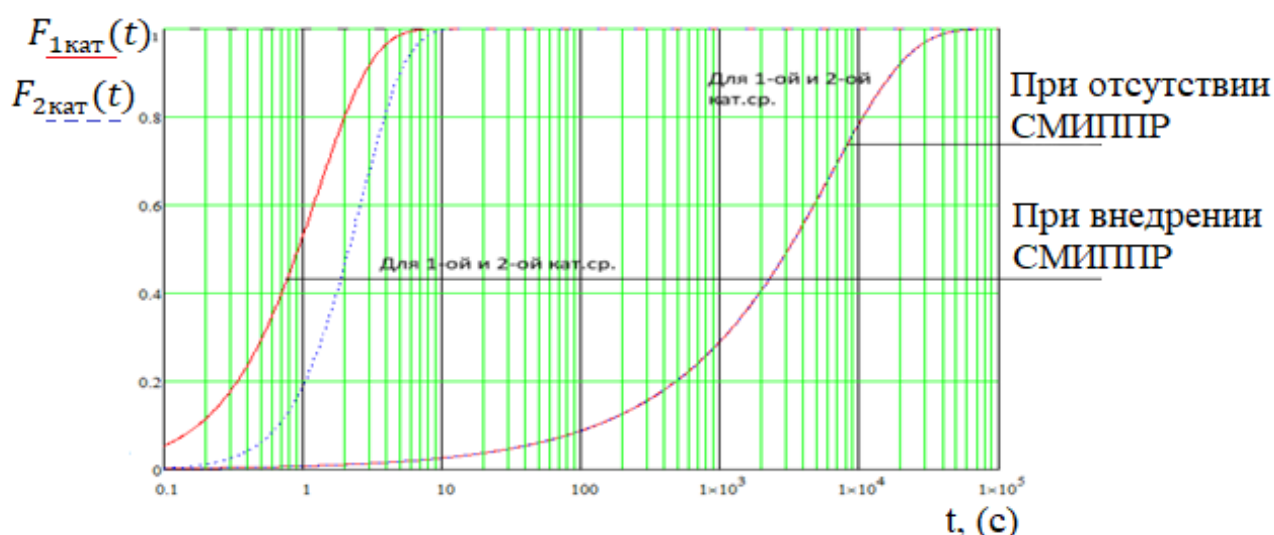


Рисунок 4.16 – Функции распределения времени передачи данных при внедрении программного модуля

Несмотря на то, что внедрение программного модуля СМППР позволило существенно сократить время передачи данных за счёт оперативного мониторинга и принятия решений достигнутое значение вероятности своевременной доставки данных за время не более заданного по-прежнему не соответствует требованиям руководящих документов [31].

4.4 Оценка качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» при совместной реализации разработанных научно-технических предложений

Как показал анализ оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов при отдельной реализации научно-технических предложений по организации структуры выделенной ТКС ТКФС ОАО «РЖД» и внедрения структуры программного модуля СМППР не позволяет обеспечить требуемый уровень вероятности своевременной доставки данных. Это указывает на необходимость совместной реализации описанных выше научно-технических предложений.

В результате выполнения научно-технических предложений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» вероятность своевременной доставки данных соответствует требованиям руководящих документов [31] (рисунок 4.17). Для данных 1-й категории срочности время передачи данных составило: $\overline{T}_{\text{пер}} = 0,4$ с. с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,999$ при $T_{\text{зад}} \leq 1$ с. Для данных 2-й категории срочности и ниже время передачи данных составило: $\overline{T}_{\text{пер}} = 4,8$ с. с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,99$ при $T_{\text{зад}} \leq 5$ с.

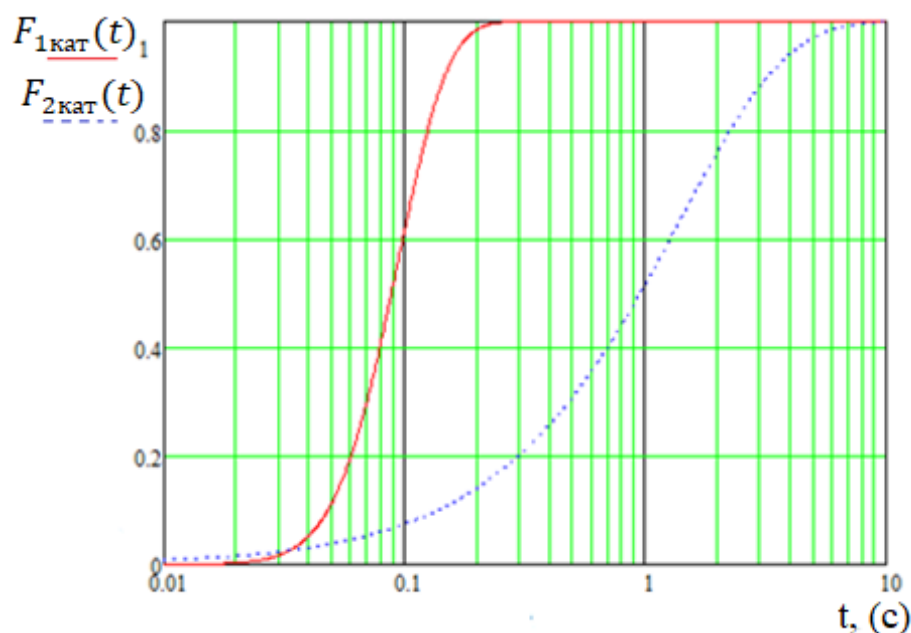


Рисунок 4.17 – Функции распределения времени передачи данных при реализации научно-технических предложений

4.5 Выводы по главе 4

1. В соответствии с разработанной методикой выбора рациональных мероприятий по повышению качества процесса функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» определены два приоритетных направления по повышению качества процесса функционирования ТКС ТКФС, направленных на снижение времени передачи данных за счёт управления ТКС. Эти меры существенно усложняют реализацию совокупности дестабилизирующих условий, за счёт ограничения доступа к оборудованию, повышения сложности и увеличения времени сбора информации, необходимого для реализации этих условий.

2. Вариант организации структуры выделенной ТКС ТКФС на базе технологии MPLS L3VPN позволил полностью исключить циркуляцию стороннего трафика, что повысило предсказуемость и детерминированность передачи управляющих команд. Кроме того, использование динамически перестраиваемых маршрутов передачи снижает возможности по сбору информации о топологии и параметрах сети. Время передачи данных сократилось с 40 с. до 5 с.

3. Внедрение структуры программного модуля СМППР в ЕСМА и автоматизированное рабочее место диспетчера, обеспечивает оперативное управление ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в режиме реального времени. Непрерывный сбор и анализ параметров сетевых элементов позволяют автоматически выявлять дестабилизирующие факторы и принимать превентивные меры по предотвращению срыва процесса передачи данных.

4. Использование полученных результатов ОАО «РЖД» позволит снизить затраты на устранение последствий инцидентов, повысить эффективность перевозочного процесса и уменьшить возможные риски возникновения аварий и катастроф. Интеграция предложенной структуры программного модуля СМППР в ЕСМА устранил необходимость замены существующей системы мониторинга и администрирования.

5. В результате совместной реализации научно-технических предложений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, достигается соответствие выбранного показателя оценки качества функционирования требованиям нормативных и руководящих документов [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью исследования в диссертационной работе решена актуальная научная задача, имеющая существенное значение в решении вопросов снижения времени передачи данных по управлению подвижными объектами ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, и заключающаяся в разработке методики оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», а также научно-технических предложений по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» за счёт организации структуры, выделенной сети на базе технологии MPLS L3VPN и внедрения структуры программного модуля СМППР управления ТКС ТКФС ОАО «РЖД».

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Определены роль и место ТКС ТКФС ОАО «РЖД», проведён анализ условий функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», результаты которого позволили выявить основные противоречия, заключающиеся в том, что существующие стандарты и нормативные документы в области обеспечения устойчивости систем управления ТКС остаются недостаточно проработанными. Это обусловлено тем, что такие системы обладают особой спецификой функционирования. Кроме того, выявлено противоречие между существованием нормативных требований к качеству функционирования ТКС и отсутствием инструментов для проведения количественной оценки качества функционирования ТКС ТКФС.

2. Разработана комплексная модель функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, позволяющая выявлять влияние внешних и внутренних дестабилизирующих факторов на время передачи данных. 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 работоспособности сетевых элементов и сети в целом после воздействий. Модель впервые количественно подтвердила синергетический

эффект дестабилизирующих факторов: время восстановления при совместном влиянии кратно увеличивается.

3. Разработана методика оценки качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, учитывающая внешние и внутренние условия 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 рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС и количественно оценивать качество функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов. Применение методики подтвердило несоответствие существующей архитектуры ТКС ТКФС нормативным требованиям.

4. В методику интегрирован подход по выбору рациональных мероприятий по повышению качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД», позволяющий получить совокупность рациональных мероприятий, учитывающих дестабилизирующие факторы. Установлено, что для повышения качества функционирования ТКС ТКФС ОАО «РЖД» требуется снижение доступности сетевых элементов, увеличение времени реализации дестабилизирующих факторов, а также организация выделенной ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Методика позволяет определять очередность внедрения мер не по стоимости, а по вкладу в достижение нормативных требований к качеству процесса функционирования.

5. Ввиду того, что в настоящий момент ТКС ТКФС ОАО «РЖД» функционирует в составе общетехнологической сети связи ОАО «РЖД» это приводит к тому, что легитимный трафик ТКС ТКФС конкурирует за сетевые ресурсы ТКС. Это приводит к задержкам передачи данных, а возможные сторонние факторы нарушают процесс передачи данных. В этой связи был предложен вариант организации структуры выделенной сети на базе технологии MPLS L3VPN. Выделенная сеть позволит изолировать легитимный трафик ТКС ТКФС ОАО «РЖД» в отдельные маршруты передачи, это приведёт к снижению времени передачи данных.

6. Для обеспечения требуемого уровня качества функционирования ТКС необходимо обеспечение оперативного мониторинга сетевых элементов и прогнозирование возможных дестабилизирующих факторов. С этой целью предложена структура программного модуля СМППР управления ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Модуль позволит оперативно обнаруживать аномалии функционирования сетевых элементов, прогнозировать поступление трафика в режиме реального времени, а также оператор способен принимать решения по управлению ТКС ТКФС ОАО «РЖД». Интеграция модуля с ЕСМА обеспечит единую панель управления для диспетчеров дирекции связи.

7. 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, а также положительной апробацией и реализацией результатов исследования в ведущих научно-исследовательских учреждениях.

8. Целесообразность внедрения предложенных решений обусловлена критической ролью ТКС ТКФС в обеспечении безопасности движения поездов. Даже кратковременные задержки передачи управляющих команд при высоких уровнях автоматизации GoA 3 – GoA 4 могут привести к авариям и катастрофам. Основные направления дальнейшей работы включают: разработку стандартов эксплуатации, выделенной ТКС и модуля СМППР. Усовершенствование алгоритмов обнаружения дестабилизирующих факторов и повышение оперативности системы управления ТКС.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

EF – expedited forwarding

EXP – experimental bits

FRR – fast reroute

GoA – grade of automation

LER – label edge router

LSP – label-switched paths

LSR – label switching router

QoS – quality of service

RSVP-TE – resource reservation protocol – traffic engineering

UGTMS – urban guided transport management system

VRF – virtual routing and forwarding

БС – базовая станция

ЕСМА – единая система мониторинга и администрирования

ЖДТ – железнодорожный транспорт

ИА – интеллектуальный агент

ИТКС – информационно-телекоммуникационная сеть

ИТС – интеллектуальная транспортная система

КВС – кадр вхождения в связь

КИИ – критическая информационная инфраструктура

КПВ – контроль посылки вызова

КПС – качество принимаемого сигнала

ОБТН – общетехнологическое назначение

ОТН – оперативно-технологическое назначение

ПЛС – преобразование Лапласа-Стилтьеса

ПО – программное обеспечение

ПС – подвижная станция

ПТЭ – правила технической эксплуатации

СМИППР – система мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений

СМО – система массового обслуживания

СОВ – система обнаружения вторжений

СУИБ – система управления информационной безопасностью

СУСП – система управления сетями производителей

ТКА – таргетированная компьютерная атака

ТКС – телекоммуникационная сеть

ТКФС – транспортная киберфизическая система

ТПСС – топологическое преобразование стохастических сетей

УИМ – уровень излучаемой мощности

УК – узел коммутации

УПС – уровень принимаемого сигнала

ФР – функция распределения

ЦД – цифровой двойник

ЭФ – эквивалентная функция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебединский, А.К. Автоматическая телефонная связь на железнодорожном транспорте / А. К. Лебединский, А. А. Павловский, Ю. В. Юркин. – М: Транспортная книга, 2008. – 529 с.
2. Юркин, Ю. В. Оперативно-технологическая телефонная связь на железнодорожном транспорте: учебник для вузов железнодорожного транспорта / Ю. В. Юркин, А. К. Лебединский, В. А. Прокофьев, И. Д. Блиндер. – М: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 264 с.
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 255 с.
4. Шелухин О. И., Сакалема Д. Ж., Филинова А. С. Обнаружение вторжений в компьютерные сети (сетевые аномалии). – 2013.
5. Стандарт ОАО «РЖД». Управление информационной безопасностью. Общие положения. СТО РЖД 1.18.002-2009. М.: – 30 с.
6. ЕСМА. Руководство пользователя. АО «Транссеть» 2006.
7. Журавлева Н. А. Методология исследования цифровой трансформации в условиях дестабилизации бизнес-моделей транспортных организаций. В кн.: Методология развития экономики, промышленности и сферы услуг в условиях цифровизации / под ред. Бабкина А. В. – СПб: СПбПУ, 2018. – С. 10–47.
8. Волкова Е. М., Лякина М. А., Стримовская А. В. Проблемы оценки экономических эффектов от использования цифровых технологий в городских транспортных системах // Бюллетень результатов научных исследований. – 2019. – № 1. – С. 59–68.
9. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 56294-2014 Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем.
10. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 71576-2024 Системы киберфизические. Общие положения.

11. Цветков Виктор Яковлевич Управление с применением кибер-физических систем // ПНиО. 2017. №3 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-s-primeneniem-kiber-fizicheskikh-sistem> (дата обращения: 23.01.2026).

12. Kacar L. Use of Safety Guarantees of Train Protection in the Safety of Autonomous Train Driving //J. Pol. Miner. Eng. Soc. – 2025. – Т. 2. – С. 1-6.

13. IEC 62290-1:2014, “Railway Applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts,” (CENELEC, 2014).

14. European Union Agency for Railways SUBSET-026, “ERTMS/ETCS – System Requirements Specification,” (UNISIG, 2023).

15. European Union Agency for Railways SUBSET-125, “ERTMS/ATO – System Requirements Specification,” (UNISIG, 2023).

16. Li H., Lai L., Poor H. V. Multicast routing for decentralized control of cyber physical systems with an application in smart grid // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2012. Vol. 30.P. 1097—1107.

17. Koubaa A., Andersson B. A Vision of Cyber-Physical Internet // Proceedings of the 8th International Workshop on Real-Time Networks. 2009. P. 1—6.

18. Гапанович В. А., Розенберг И. Н. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2011. – №. 4. – С. 5-11.

19. ФЗ №187 О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации.

20. Алиев, Т. И. Сети ЭВМ и телекоммуникации: учебное пособие / Т. И. Алиев. – СПб: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2011. – 399 с.

21. Канаев Андрей Константинович, Привалов Андрей Андреевич, Котов Владимир Кириллович, Лебединский Аркадий Константинович, Плеханов Павел Андреевич, Роенков Дмитрий Николаевич Телекоммуникационные системы и сети высокоскоростного железнодорожного транспорта // БРНИ. 2017. №3. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/telekommunikatsionnye-sistemy-i-seti-vysokoskorostnogo-zheleznodorozhnogo-transporta> (дата обращения: 11.06.2025).

22. Концепция развития первичной сети связи ОАО «РЖД» до 2015 года. - М.: ОАО «РЖД» - ЦСС, 2013.

23. Скуднева, Е. В. Подход к способу распределения информационного обмена в сети передачи данных оперативно-технологического назначения / Е. В. Скуднева, А. А. Привалов, А. М. Болдинов // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – 2024. – № 1(79). – С. 256-258. – EDN FZNWMF.

24. МСЭ-Т E.800 (09/2008) “Определение терминов, относящихся к качеству обслуживания”.

25. Смирнов Д. Ю. Автоматизированные системы управления на железнодорожном транспорте. — СПб: СПбГУПС, 2021.

26. Бойченко О. В., Кравцов И. О. Сетевая атака «отказ в обслуживании» // Проблемы информационной безопасности. – 2016. – С. 219.

27. ISO/IEC 27001:2022 — Information Security Management Systems

28. Методический документ «Меры защиты информации в государственных информационных системах», утвержден ФСТЭК России 11.02.14. – 176 с.

29. Кузнецов А. Ю., Гущин А. Н. Кибербезопасность автоматизированных систем управления на железнодорожном транспорте // Вестник транспорта. — 2022. — №4(66). — С. 55–62.

30. Отчет о научно-исследовательской работе 22.1.01. Технологии передачи данных систем оперативно-технологического назначения в цифровых сетях технологической связи / Государственное унитарное предприятие Российский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи (ВНИИАС МПС России). – М.:, 2005. – 49 с.

31. ГОСТ РВ 51987-2002 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Типовые требования и показатели качества

функционирования информационных систем. Общие положения. – М.: Госстандарт России, 2002. – 54 с.

32. МСЭ T Recommendation Y.1540. IP Packet Transfer and Availability Performance parameters//December, 2002.

33. МСЭ T Recommendation Y.1541. Network Performance Objectives for IP Based Services//May, 2002.

34. ОАО «РЖД». Единая система мониторинга и администрирования (ЕСМА). «Модуль управления инцидентами и проблемами» (ЕСМА TRS Manager). Руководство пользователя. Версия 1.4. 2008 г.

35. ОАО «РЖД». Единая система мониторинга и администрирования (ЕСМА). Модули взаимодействия «ЕСМА учёт ресурсов» с системами управления сетями производителей ОАО «Морион», ЗАО «НОВЕЛ-ИЛ», ЭЗНП РАН, НПЛ «Пульсар», ЗАО «НТЦ Натекс» («Стыковка с СУСП»). Руководство пользователя. Версия 1. 2006 г.

36. Концепция обеспечения кибербезопасности информационных и управляющих систем в ОАО «РЖД» (проект редакция 1.0). – М.: ОАО «РЖД», 2013. – 285 с.

37. Болдинов, А. М. Угрозы телекоммуникационным сетям в киберфизических системах / А. М. Болдинов, А. А. Привалов // СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2022. – № 1(77). – С. 182-184. – EDN HROC UK.

38. ГОСТ Р 56205-2014 IEC/TS 62443-1-1:2009.

39. Алигулиев Р. М., Имамвердиев Я. Н., Сухостат Л. В. Киберфизические системы: основные понятия и вопросы обеспечения безопасности //Информационные технологии. – 2017. – Т. 23. – №. 7. – С. 517-528.

40. Wang E. K., Ye Y., Xu X., Yiu S. M., Hui L. C. K., Chow K. P. Security Issues and Challenges for Cyber Physical System // IEEE/ACM International Conference on on Cyber, Physical and Social Computing. 2010. P. 733—738

41. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L. A., Coen-Porisini A. Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead // Computer Networks. 2015. Vol. 76. P. 146—164.

42. Xu D., Tu M., Sanford M., Thomas L., Woodraska D., Xu W. Automated security test generation with formal threat models // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. 2012. Vol. 9, N. 4. P. 525—539.

43. Brooks Z. Hacking Driverless Vehicles // DEFCON. URL: <https://www.defcon.org/images/defcon-21/dc-21-presentations/Zoz/DEFCON-21-Zoz-Hacking-Driverless-Vehicles.pdf> (дата обращения: 24.12.24)

44. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка). Утверждена заместителем директора ФСТЭК России 15.02.08. – 70 с.

45. Модель угроз и нарушителя безопасности персональных данных, обрабатываемых в типовых информационных системах персональных данных отрасли. – М.: 2010. – 48 с.

46. Евглевская, Н. В. Обобщенная модель информационного воздействия на автоматизированные системы управления техническими объектами/ Н. В. Евглевская, А. А. Привалов, Ал. А. Привалов // Журнал ВАК «Вопросы радиоэлектроники», 2013. – №1. – С. 155-164.

47. ГОСТ Р 53113.1 2008 Защита информационных технологий и автоматизированных систем от угроз информационной безопасности, реализуемых с использованием скрытых каналов. Часть 1.

48. ГОСТ Р 53113.1 2008 Защита информационных технологий и автоматизированных систем от угроз информационной безопасности, реализуемых с использованием скрытых каналов. Часть 2.

49. Хорев, П. Б. Методы и средства защиты информации в компьютерных системах / П. Б. Хорев. – М: Академия, 2005. – 256 с.

50. Евглевская, Н. В. Модуль поддержки принятия решений по управлению информационной безопасностью телекоммуникационной сети единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками ОАО «РЖД» на основе рационального выбора организационно-технических мероприятий / Н. В. Евглевская, Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов, Д. Н. Шахматов // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2016. – №2 (47). – С. 80-91.

51. Евглевская, Н. В. Способ мониторинга процесса передачи сообщений по каналам телекоммуникационных систем ОАО «РЖД» / Г. А. Бекбаев, Н. В. Евглевская, А. А. Привалов, Е. В. Скуднева // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2015. – №2 (43). – С. 29-32.

52. 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. – EDN DPFGOB.

53. Васильев, К. К. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие / К. К. Васильев, М. Н. Служивый. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 170 с.

54. Привалов, А. А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ / А. А. Привалов. – СПб: ВМА, 2000. – 166 с.

55. Oldham, K.B. The Fractional Calculus / K.B. Oldham, J. Spanier. – Academic Press, 1974. – 234 p

56. Куделя, В. Н. Методы математического моделирования систем и процессов связи / В. Н. Куделя, А. А. Привалов, О. В. Петриева, В. П. Чемиренко; под общ. ред. В. П. Чемиренко. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 368 с.

57. Меньшаков, Ю.К. Защита объектов и информации от технических средств разведки: научно-учебное пособие / Ю. К. Меньшаков. – М: Российск. гос. гуманит. ун-т, 2002. – 399 с., 90. Халяпин, Д. Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! / Д. Б. Халяпин. – М: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.

58. Коцыняк, М. А. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей / М. А. Коцыняк, И. А. Кулешов, О. С. Лаута. – СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013. – 91 с.

59. Бойко Алексей Александрович, Дегтярёв Иван Сергеевич Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем //

Системы управления, связи и безопасности. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-otsenki-vesovyh-koeffitsientov-elementov-organizatsionno-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 30.01.2026).

60. 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.

61. Ярочкин, В. И. Информационная безопасность: учебник для вузов / В. И. Ярочкин. – М: ООО «Академический проект», 2004. – 544 с.

62. Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных, утверждена заместителем директора ФСТЭК России 14.02.08. – 10 с.

63. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М: «Наука», 1973. – 368 с.

64. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения: учебное пособие для вузов. 2-е изд. стер. / Е. С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М: Высшая школа, 2000. – 383 с.

65. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М: Наука, 1969. – 576 с.

66. Малофей, А. О. Математическая модель каналов передачи данных в условиях преднамеренных помех / А. О. Малофей, А. А. Смирнов // Информационные системы. – 1998. – № 3 (11). – С. 3–7.

67. Чучин, Е. В. Принципы системного построения моделей качества передачи информации по цифровым радиоканалам / Е. В. Чучин // Auditorium. – 2014. – №1 (1). – С. 73–79.

68. Tolstova, A. V. Algorithm for Forming Structure and Stages of Message Transfer in Unidirectional Radio Systems / A. V. Tolstova, O. V. Zaluzhnyi, V. D. Hol // Radioelectronics & Communications Systems. – 2020. – Vol. 63, Iss. 5. – P. 265–272.

69. Rajba, S. Simulation study of the random-access control in the wireless sensor network / S. Rajba, T. Rajba, P. Raif // Ukrainian Scientific Journal of Information Security. – 2013. – T. 19, No. 1. – P. 7–13.

70. Khodaverdizadeh, M. Improving the Performance of HF Radio Networks in the Presence of Interference through Automatic Link Establishment with Frequency Hopping Technique / M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi // Wireless Personal Communications. – 2022. – No. 127. – P. 2647–2666.

71. Bilal, A. Automatic Link Establishment for HF Radios / A. Bilal, G. Sun // 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), (Beijing, China, 2017). – 2017. – P. 640–643.

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

73. 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 2023 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург: ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. – С. 75-80. – EDN QENEUL.

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

75. 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. – EDN FMJYCU.

76. Зорич, В. А. Математический анализ: учебник. Часть II. / В.А. Зорич. – Москва: Наука, 1984. – 640 с.

77. 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»: № 2024611678: 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». – EDN INRKAH.

78. Привалов А. А., Лукичева В. Л., Титов Д. Д. Модель процесса функционирования узла коммутации технологической сети передачи данных в условиях DDOS атак нарушителя //Информация и космос. – 2021. – №. 2. – С. 66-75.

79. Привалов, А. А. К вопросу о расчёте 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. – EDN DIPGZM.

80. Лукичева В.Л., Привалов А.А., Титов Д.Д. Модель процесса доставки пакетов по каналу передачи данных в условиях компьютерных атак нарушителя // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. №2.

81. Абрамов, Г. В. Исследование влияния интенсивности отправки пакетов на время их доставки / Г. В. Абрамов, Р. В. Данилов, Л. Д. Ж. К. Паулу // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11–13 ноября 2019 года / ФГБОУ

ВО «Воронежский государственный университет». – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2020. – С. 547-550. – EDN JNFLHA.

82. Неволин, Д. Г. Сети и системы передачи данных на железнодорожном транспорте: учеб. пособие / Д. Г. Неволин. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – 187 с.

83. Искольный, Б. Б. Оценка живучести распределенных информационно-телекоммуникационных сетей / Б. Б. Искольный, Р. В. Максимов, С. Р. Шарифуллин // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 5 (24). – С. 72–82.

84. Полумарковская модель телекоммуникационной сети с динамическим управлением / Д.А. Мищенко, А.А. Львов, М.С. Светлов [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №5 (222). – С. 49–60.

85. Модель воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть / М. А. Коцыняк, О. С. Лаута, Д. А. Иванов, О. М. Лукина // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2019. – № 3-4 (129-130). – С. 58–65.

86. Бекбаев, Г. А. Подход к моделированию процесса DDoS-атаки на информационно-телекоммуникационную сеть железнодорожного транспорта / Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов, О. А. Турдиев // Вестник СамГУПС. – 2018. – № 1. – С. 100–108.

87. Антонова, В. М. Исследование эффективности совместной передачи разнородного трафика в соте сети LTE / В. М. Антонова, Е. Е. Маликова // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. – 2017. – Т. 11, № 9. – С. 22–25.

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

89. Мартин, Дж. Системный анализ передачи данных. В 2 т. Т. II. Проектирование систем передачи данных / Дж. Мартин; пер. с англ.; ред. В.С. Лапин. – Москва: Мир, 1975. – 432 с.

90. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок; пер. с англ.; под ред. В.И. Неймана. – Москва: Машиностроение, 1979. – 432 с.
91. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок; пер. с англ. В.И. Нейман; под ред. Б.С. Цыбакова. – Москва: Мир, 1979. – 600 с.
92. Назаров, А. Н. Модели и методы исследования процессов функционирования узлов коммутации сетей связи следующего поколения при произвольных распределениях поступления и обслуживания заявок различных классов качества / А.Н. Назаров, К.И. Сычев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6, № 7. – С. 135–140.
93. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // РТС. 2013. №4 (12). С. 69-79.
94. Карганов В. В., Расчесова А. Г., Кудряшов В. А. Показатель оценки эффективности систем связи и их элементов // Информатика, телекоммуникации и управление. 2016. №1 (236). С. 7-14.
95. Одоевский Сергей Михайлович, Лебедев Павел Владимирович Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №1. С. 152-189.
96. Бабинов В.Н. Разработка моделей и методик оценки эффективности комплексной системы защиты информации: дис. канд. технич. наук: 05.13.19 / Бабинов Владимир Николаевич. – Спб., 2006. – 147 с.
97. Бухарин В.В., Кирьянов А.В., Стародубцев Ю.И. Способ защиты информационно-вычислительных сетей от компьютерных атак / «Труды МАИ»: электронный научный журнал, 2012. – №57.
98. Захарченко С. С., Корниенко А. А., Ададуров С. Е. Показатели эффективности выявления уязвимостей при использовании метода проверки на модели / Труды IV-й международной научно-практической конференции «Интеллекттранс-2014», 2014. – С. 211-213.

99. ГОСТ Р 53953 Электросвязь железнодорожная. Термины и определения – М.: 2010. – 52 с.
100. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.
101. Привалов, А. А. 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. – EDN VGGYAB.
102. Вандич, А. П. Методика оценки оперативности управления телекоммуникационной сетью ОАО «РЖД» в нестационарных условиях: дис. ... канд. технич. наук: 05.12.13 / Вандич Алексей Павлович. – СПб., 2013. – 142 с.
103. 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. – 2025. – № 1. – С. 291-296. – EDN TOZCJQ.
104. ГОСТ Р 57580.2-2018 — национальный стандарт Российской Федерации «Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Методика оценки соответствия»
105. Таненбаум Э. Компьютерные сети/ Э. Таненбаум; пер. П.А. Вильчинский. 5-е изд.-СПб.:Питер, 2012.-960 с.
106. Гольдштейн А., Гольдштейн Б. Технология и протоколы MPLS. Санкт-Петербург: BHV, 2005.
107. Раимкулов У. М., Нуритдинов Ш. Ш. Использование сегментной маршрутизации в программно-управляемых сетях для повышения их надежности и масштабируемости // sajar. 2025. № 2
108. Скуднева, Е. В. Метод повышения структурной скрытности сетей передачи данных оперативно технологического назначения ОАО «РЖД» / А. А. Привалов, Е. В. Скуднева, А. П. Вандич, М. А. Яичкин, // ТРУДЫ ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал. Том 2 (3) – СПб.: 2016. – С. 65-75.

109. Скуднева, Е. В. Методика маскирования информационного обмена в сетях передачи данных оперативно технологического назначения ОАО «РЖД» / А. А. Привалов, Е. В. Скуднева // Труды конференции.\СПОЙСУ. – СПб.: 2016. – С. 44-49.

110. Awduche D. et al. RSVP-TE: extensions to RSVP for LSP tunnels. – 2001. – №. rfc3209.

111. 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. – EDN OIEGUB.

112. Гончаров А. С., Саклаков В. М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии //Информационно-телекоммуникационные системы и технологии. – 2018. – С. 24-26.

113. Агеев С. А. и др. Интеллектуальное иерархическое управление рисками информационной безопасности в защищенных мультисервисных сетях специального назначения //Автоматизация процессов управления. – 2014. – №. 3. – С. 78-88.

114. Цифровые технологии в системах обеспечения движения поездов: практикум / С. М. Куценко, О. Г. Евдокимова, Е. В. Казакевич [и др.]. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – 55 с. – ISBN 978-5-7641-1995-3. – EDN CNYURL.

115. 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». – EDN GTAELI.

116. Коробейников А. Г. Применение искусственных нейронных сетей в системах автоматического управления магнитной левитацией // Программные продукты и системы. – 2022. – Т. 35. – №. 3. – С. 452-457.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ИНСТИТУТ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ,
СВЯЗИ И РАДИО НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ
«ГИПРОТРАНССИГНАЛСВЯЗЬ» -
ФИЛИАЛ АО «РОСЖЕЛДОРПРОЕКТ»

192007 г. Санкт-Петербург, ул. Боровая, дом 49, тел. (812) 319-15-50, e-mail: qtss@rzdpr.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер

«Гипротрансигналсвязь» – филиала
АО «Росжелдорпроект»



Блёскин М.А.

АКТ

научно-технической комиссии «Гипротрансигналсвязь» -
филиала АО «Росжелдорпроект» о реализации результатов
диссертационной работы
Болдинова Алексея Максимовича

Научно-техническая комиссия в составе: председателя – начальника отдела связи Корпусенко Е. Г., членов комиссии – главного специалиста отдела связи Ванчикова А. С., главного инженера проекта Воробьева Е. В. составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в диссертационной работе Болдинова А. М. на тему: «Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» используются при проектировании систем передачи первичной сети связи, а именно:

1. Анализ дестабилизирующих факторов в отношении телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД».
2. Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.
3. Научно-технические предложения по повышению качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, внедрены по пункту:
 - Вариант организации структуры выделенной телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД».

Комиссия отмечает практическую значимость и новизну указанных результатов для целей проектирования при построении современных технологических сетей связи.

Председатель комиссии

Главный специалист, к.т.н.

Главный инженер проекта

Корпусенко Е.Г.

Ванчиков А.С.

Воробьев Е.В.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



Проректор по научной
и инновационной деятельности
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

А.А. Семенов

«08» апреля 2026 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Болдинова Алексея Максимовича
«Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной сети
транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД»**

Составлен комиссией в составе:

Председатель: Директор НИИ «Прогноз», профессор кафедры РС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», к.т.н. В. И. Веремьев.

Члены комиссии: Старший научный сотрудник НИИ «Прогноз», к.т.н., Коновалов А. А., старший научный сотрудник НИИ «Прогноз», доцент кафедры РС, к.т.н., Воробьев Е. Н.

Комиссия составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Болдинова А. М. «Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД», были использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых в НИИ «Прогноз» в направлении разработки пространственно разнесенных информационных систем мониторинга.

В ходе выполнения указанных исследований были использованы разработанные Болдиновым А. М.:

1. Комплексная модель функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.
2. Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.
3. Научно-технические предложения по повышению качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов, по пункту:

- Структура программного модуля системы мониторинга с интегрированной поддержкой принятия решений по управлению телекоммуникационной сетью транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД».

Эти работы составляют часть исследований, ведущихся в НИИ «Прогноз» в направлении создания многофункционального комплекса мониторинга.

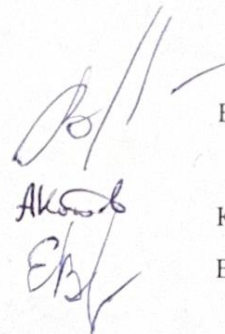
Председатель:

Директор НИИ «Прогноз», к.т.н.

Члены комиссии:

Старший научный сотрудник НИИ «Прогноз», к.т.н.

Старший научный сотрудник НИИ «Прогноз», к.т.н.

Three handwritten signatures in blue ink. The top signature is large and stylized. The middle signature is smaller and includes the letters 'АК' and 'В'. The bottom signature is also smaller and includes the letters 'ЕВ'.

Веремьев В. И.

Коновалов А. А.

Воробьев Е. Н.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21
E-mail: dou@pgups.ru, <http://www.pgups.ru>

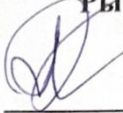
УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор

по учебной работе,

к.т.н., профессор

Рыбин Петр Кириллович

  13.09 2026 г.

А К Т

о внедрении научных результатов диссертационной работы

Болдинова Алексея Максимовича

Научно-техническая комиссия в составе: председателя – заведующего кафедрой «Электрическая связь» кандидата технических наук, доцента Казакевич Е.В. и членов: доцента кафедры, кандидата технических наук Крючковой Т.В., доцента кафедры, кандидата технических наук Куценко С.М. составила настоящий акт о том, что в учебном процессе кафедры «Электрическая связь» при проведении занятий по дисциплинам «Передача дискретных сообщений на железнодорожном транспорте» и «Цифровые технологии в системах обеспечения движения поездов» использованы следующие научные результаты, полученные в диссертационной работе Болдинова А. М.:

1. Комплексная модель функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.
2. Методика оценки качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.
3. Научно-технические предложения по повышению качества функционирования телекоммуникационной сети транспортной киберфизической системы ОАО «РЖД» в условиях дестабилизирующих факторов.

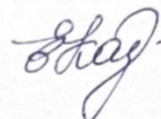
Результаты работы Болдинова А. М. применяются в образовательном процессе по упомянутым выше дисциплинам, отражают усвоение профессиональных навыков и приобретение знаний по вопросам построения телекоммуникационных сетей и оценке их качества, а также был сформирован цикл лабораторных работ по изучению цифровых технологий на железнодорожном транспорте.

Использование результатов диссертации Болдинова А. М. в учебном процессе оформлено протоколом заседания кафедры «Электрическая связь» № 10 от 28 апреля 2026 г.

Председатель комиссии:

Заведующий кафедрой «Электрическая связь»

к.т.н., доцент



Е.В. Казакевич

Члены комиссии:

Доцент кафедры «Электрическая связь»

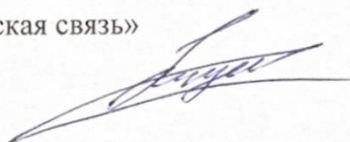
к.т.н.



Т.В. Крючкова

Доцент кафедры «Электрическая связь»

к.т.н.



С.М. Куценко

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024613200

**Программа для определения эквивалентной функции в
виде стохастической сети, включающей в себя
логический узел «И»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I» (RU)*

Авторы: *Болдинов Алексей Максимович (RU), Привалов Андрей
Андреевич (RU), Привалов Александр Андреевич (RU)*

Заявка № 2024611678

Дата поступления 29 января 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 февраля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025680872

**Программа мониторинга кибербезопасности
телекоммуникационной сети в условиях
кибервоздействий и технических отказов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I» (RU)*

Авторы: *Болдинов Алексей Максимович (RU), Привалов
Андрей Андреевич (RU)*

Заявка № 2025669572

Дата поступления 30 июля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 августа 2025 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов