

На правах рукописи



Лобеев Дмитрий Петрович

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА
LTE-1800 TDD НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ**

2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель: **Биятдинов Камиль Закирович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Григорьев Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО «Лаборатория
инфокоммуникационных сетей» (ЛИС),
г. Санкт-Петербург
Ковцур Максим Михайлович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
информационной безопасности компьютерных сетей
(ИБКС) Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ), г. Санкт-
Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
учреждение «Национальный исследовательский
центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева»
(ФГАУ НИЦ Телеком)

Защита диссертации состоится «22» декабря 2026 г. в 14 ч. 00 мин.
на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 Санкт-Петербургского
государственного университета аэрокосмического приборостроения по адресу:
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

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

Автореферат разослан «22» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.01
кандидат технических наук, доцент



А. М. Сергеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Динамичное развитие и совершенствование железнодорожного транспорта Российской Федерации, особенно в сегменте высокоскоростных магистралей, обуславливает необходимость модернизации телекоммуникационной инфраструктуры. Критически важным элементом здесь выступает обеспечение надежной мобильной широкополосной радиосвязи на высокоскоростных железнодорожных магистралах.

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений в этой предметной области является применение широкополосной радиосвязи стандарта LTE, позволяющей консолидировать голос, телеметрию, видеонаблюдение и команды управления в единую сеть. Специально для применения технологии LTE была выделена полоса радиочастот 1785-1805 МГц.

Существующие сети технологической железнодорожной радиосвязи являются аналоговыми либо цифровыми стандартов GSM-R и DMR. Данные стандарты не могут обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к технологическим сетям радиосвязи на высокоскоростных железнодорожных магистралах. Поэтому сегодня усиливается актуальность и значимость своевременной и качественной разработки проектов технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. При этом до настоящего времени не были разработаны и внедрены в достаточной степени универсальные методологические и технические решения для проектирования технологических сетей радиосвязи (далее – TCP) стандарта LTE-1800 TDD.

Требования к повышению (обеспечению) качества связи определяют необходимость разрешения сложившихся **противоречий** между выделенным ограниченным частотным диапазоном TCP стандарта LTE-1800 TDD и требованиями к электромагнитной совместимости (далее – ЭМС), ограничениями по мощности базовых станций (далее – БС) и увеличению скорости передачи данных в зоне обслуживания БС на высокоскоростных железнодорожных магистралах (далее – ВСЖМ).

Таким образом, для разрешения сложившихся противоречий целесообразно сформулировать актуальную **научную задачу**: на основе анализа условий функционирования технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, разработать модель и методику повышения качества функционирования TCP, а также научно-технические предложения и решения по снижению уровня взаимных помех при существующих ограничениях для стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралах, как взаимосвязанного комплекса методологических, технических и технологических решений, что в современных условиях вносит значительный вклад в развитие и совершенствование сетей связи железнодорожного транспорта Российской Федерации как важнейшей отрасли экономики.

Решение вышеназванной задачи возможно на основе комплексного и системного подходов с учётом государственного приоритета развития и

строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей, функционирующих в ТСП на базе перспективного стандарта LTE-1800 TDD.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области создания и совершенствования ТСП занимались многие ученые: М.А. Шнепс-Шнеппе, В.Ю. Бабков, В.Г. Скрынников, А.А. Гриценко, А. М. Тюрликов, А. М. Сергеев, Т. М. Татарникова, В. А. Григорьев, В.О. Тихвинский, С.С. Коган, О. И. Саута, С. В. Беззатеев, Г.Л. Беляев, С. В. Березенко, S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, H. Holma, A. Toskala и др. Однако, результаты этих научных трудов напрямую не применимы при проектировании ТСП для высокоскоростных железнодорожных магистралей, вследствие отсутствия моделей и методик проектирования, учитывающих специфику организации связи на железнодорожном транспорте.

Всё вышеизложенное обосновывает актуальность научной задачи и выбор темы диссертационной работы.

Объект исследования – технологические сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистральных.

Предмет исследования – методика, модели, научно-технические предложения и решения по повышению качества функционирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистральных на этапе проектирования и оценке качества связи.

Цель диссертационной работы – совершенствование проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в полосе частот 1785-1805 МГц путём оптимизации использования ограниченного частотного ресурса и увеличения зоны обслуживания базовых станций в условиях высокоскоростного движения при скоростях от 250 до 400 км/ч.

В основу работы положена **гипотеза**: модели, методика, научно-технические предложения и решения позволят увеличить зону обслуживания базовых станций в выделенной полосе частот 1785-1805 МГц на 40%, а также сократят время проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD (далее – ТСП LTE-1800 TDD).

Для достижения поставленной цели, решения научной задачи и проверки правильности гипотезы были поставлены и решены следующие **задачи диссертационной работы**:

1. Разработка, внедрение и оценка результатов внедрения методики использования частотного ресурса и модели временной синхронизации режимов работы базовых станций при проектировании ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ (далее – Методика).

2. Разработка, внедрение и оценка результатов внедрения обобщенной модели технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистральных и других сетей связи в совместных зонах обслуживания (далее – Модель).

3. Разработка, внедрение и оценка результатов внедрения научно-технических предложений и решений (далее – НТП) по проектированию ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в решении

актуальной задачи повышения качества функционирования TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ на этапе проектирования.

В отличие от существующих подходов, ориентированных на типовые условия развертывания сетей, предложенные результаты учитывают специфические ограничения и особенности ВСЖМ: выделенная полоса 1785–1805 МГц и применение стандарта LTE TDD, экстремально высокие скорости движения (до 400 км/ч) и жесткие требования к пропускной способности. Это позволило получить новые научные и практические результаты:

1. В Методике и модели впервые определены и научно обоснованы процедуры использования выделенной полосы радиочастот, которые, в отличие от универсальных решений, адаптированы к динамике высокоскоростного движения, что обеспечивает нейтрализацию внутренних помех, повышение скорости передачи данных и улучшение ЭМС.

Также, решить задачу территориально-временного разнеса ограниченного частотного спектра возможно методом целочисленного линейного программирования (далее – ЦЛП). Сам метод решения задач ЦЛП давно известен, однако решение задачи распределения частот для TSP LTE-1800 TDD методом ЦЛП является новым научным решением.

2. Разработана обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания, которая, в отличие от стандартных конфигураций, учитывает специфику ВСЖМ, позволяя гибко управлять зоной обслуживания и пропускной способностью в условиях ограниченного частотного ресурса.

3. Разработаны НТП по компенсации негативного воздействия эффекта Доплера на ВСЖМ при скоростях до 400 км/ч, а также применению фазированных антенн ММО и расчету дальности радиосвязи, что в совокупности обеспечивает расширение зоны обслуживания базовых станций и повышение качества функционирования TSP в условиях высокоскоростного движения.

Теоретическая значимость результатов заключается в развитии научно-методического аппарата проектирования TSP LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения.

Практическая значимость результатов исследования состоит в том, что полученные результаты позволяют существенно повысить эффективность проектирования и эксплуатации TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Разработаны рекомендации по комплексному применению результатов диссертационного исследования для повышения качества, сокращения времени проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составляют: контент-анализ научных и технических источников, охватывающих область исследования, общесистемный анализ, элементы теории принятия решений, теория распространения радиоволн, теория сигналов, теория вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования на ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика использования частотного ресурса и модель временной синхронизации режимов работы БС при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях, обеспечивающие повышение эффективности применения частотного ресурса в диапазоне частот 1785-1805 МГц методом ЦЛП в интересах обеспечения связи на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

2. Обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания обеспечивает увеличение площади зоны устойчивой радиосвязи и улучшение электромагнитной совместимости.

3. Научно-технические предложения и решения по проектированию технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях обеспечивают повышение эффективности использования частотного ресурса и снижение негативного влияния эффекта Доплера.

Степень достоверности.

Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов определяется корректным использованием апробированных методов и моделей, предварительным статистическим анализом результатов оценки эффективности применения Методики, Модели и НТП, непротиворечивостью результатов исследования с практикой проектирования и расчетов радиосетей, а также теоретическими и практическими результатами смежных исследований, согласованностью результатов моделирования. Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения Методики, Модели и НТП.

Апробация работы. Содержание диссертации было доложено и получило одобрение:

- на 9 научных конференциях и семинарах: 78-й и 79-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной дню радио, XI Международном форуме о профессиональных сетях и системах связи ProfComm 2024, XXXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2025), посвященной 130-летию изобретения радио, IV Межвузовской научно-практической конференции на тему: «Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей специального назначения», Всероссийской научной конференции «Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники», Международном симпозиуме «Цифровая парадигма информационно-аналитического обеспечения учетных и финансовых процессов в отраслевых экономиках», Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика совершенствования отечественных систем связи, автоматизации и информационной безопасности», семинарах кафедр «Электрическая связь» и «Информатика и информационная безопасность» ПГУПС.

Исследование выполнялось в период с 2022 по 2026 год.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2 и 18 паспорта специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора состоит в формулировке и обосновании задачи исследования и нахождении рационального пути ее решения, заключающегося в разработке и внедрении Методики, Модели и НТП.

Все научные результаты получены автором самостоятельно.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Научные результаты, полученные в диссертации, доведены до практического применения при проектировании TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Они представляют непосредственный интерес в области проектирования радиотехнических и телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта. Результаты диссертационной работы реализованы (внедрены) на предприятиях: АО «НИИ «Масштаб», проектный институт «Гипротрансигнальсвязь» - филиал АО «Росжелдорпроект», ФГКБОУ ВПО «ВАС имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» МО РФ, Центральный региональный центр связи- структурное подразделение Центральной станции связи – филиал ОАО «РЖД».

Публикации по теме диссертации. Материалы работы изложены в полной мере в 22 публикациях, из них: 13 статей в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий (перечень ВАК при Минобрнауки России); 7 статей, опубликованных в сборниках трудов конференций; 2 результата интеллектуальной деятельности.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 150 источников, и 2 приложений. Общий объём диссертации с приложениями составляет 233 страницы, включая 92 рисунка и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и задачи исследования, сформулированы предмет, цель, гипотеза, методологическая основа исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации, реализации и публикации результатов диссертации.

Первая глава посвящена анализу технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и постановке задачи исследования. Глава состоит из 5 параграфов.

Определены задачи и особенности TSP, этапы жизненного цикла TSP и аспекты проектирования TSP. Проведён анализ технологий стандартов DMR, TETRA, GSM-R и выделены основные их преимущества и недостатки. Научно-обоснованы перспективы развития TSP на ВСЖМ. Определены возможности, перспективы, допущения и ограничения TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ. Проведён анализ существующих методов, способов и моделей TSP LTE-1800 TDD,

применяемых на железнодорожном транспорте. Выполнена постановка задачи на разработку и внедрение Методики, Модели и НТП по проектированию TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Во второй главе представлены разработанные методика использования частотного ресурса и модель временной синхронизации режимов работы базовых станций при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях (*далее – Методика, первое положение, выносимое на защиту*).

Назначение Методики и модели (рис. 1) заключается в обеспечении скорости передачи данных, при этом обеспечивающая рациональное использование частотного ресурса при улучшении внутрисистемной ЭМС для увеличения пропускной способности при проектировании TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ в условиях влияния различных радиопомех.

Допущения: при отсутствии требований по пропускной способности к сети связи, возможно применение любой рекомендуемой модели МСЭ-R (Рекомендация Р.1546, Рекомендация Р.1812, Модель Okumura-Hata).

Ограничения:

1. Полоса радиочастот: 1785 – 1805 МГц.
2. Скорость передачи данных: не менее 2 Мбит/с по DL и 1 Мбит/с по UL.
3. Выполнение требований размещения БС в полосе отвода железнодорожной магистрали для нивелирования негативных влияний эффекта Доплера.

Методика (рис. 1) разработана для применения при проектировании TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ моделей МСЭ-R и Модели, разработанной автором.

Для обеспечения ЭМС разработана модель временной синхронизации режимов работы БС (рис. 2). Физический смысл модели: в режиме TDD необходимо обеспечить относительный сдвиг радиокадров смежных БС на величину половины его длительности. При этом циклы приема и передачи на смежных БС будут разные. БС с нечетными номерами на момент времени t_1 работают на передачу. Соответственно, БС с четными номерами – на прием. В момент времени t_2 – наоборот.

В Методике согласно установленной нумерации (рис. 1), применяется следующая усовершенствованная (за счет подбора коэффициентов) формула (1) и стандартные формулы (2-4) для расчетов:

1. Формула расчета потерь напряженности поля для зоны обслуживания базовой станции (L_p) с учетом частотного критерия отбора радиоэлектронного средства:

$$\begin{aligned}
 L_p &= 4.56 - 13.82 \lg(h_{\text{БС}}) + 53.73 \lg(f) - [1.1 \lg(f) - 0.7] h_{\text{АС}} - 4.78 [\lg(f)]^2 \\
 &\quad + [44.9 - 6.55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(d), \text{ дБ} \\
 L_{\text{bfs}} &= 92.44 + 20 \lg f + 20 \lg d, \text{ дБ} \\
 \left(f_t + \frac{B_{\text{Ht}}}{2} > f_r - \frac{B_{\text{Hr}}}{2} \right) \text{ AND } \left(f_t + \frac{B_{\text{Ht}}}{2} > f_r + \frac{B_{\text{Hr}}}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

где h_{BC} – высота БС, м; f – частота, МГц; h_{AC} – высота абонентской станции, м; d – протяженность трассы, м; B_{Nt} – ширина спектра помехи с учетом маски спектра по уровню -60 дБ, -50 дБ, 40 дБ и др.; f_t – центральная частота передачи РЭС-источника помех, МГц; B_{Hr} – полоса пропускания РЭС-рецептора помех, МГц; f_r – центральная частота приема РЭС-рецептора помех, МГц.

2. Формула расчета коэффициента ошибок при передаче информации ($K_{Oш}$):

$$K_{Oш} = N_{Oш}/N \quad (2)$$

где $N_{Oш}$ – количество ошибок, бит; N – количество переданной информации, бит.

3. Формула расчета потерь в антенно-фидерном тракте (АФТ) – $W_{АФТ}$:

$$W_{АФТ} = W_c * L + W_{cc} * N + W_{доп} \quad (3)$$

где W_c – погонное затухание сигнала в кабеле на рабочей частоте, дБ/м;

L – длина кабеля, м; W_{cc} – потери в разъеме, дБ; N – количество разъемов, шт; $W_{доп}$ – дополнительные потери в антенно-фидерном оборудовании, дБ.

4. Формула для расчета зоны обслуживания БС в прямом направлении (к абонентской станции) (S_{rAC}):

$$S_{rAC} = EIRPP_{BC} - G_{tr} + KU_{rAC} - A_{rAC} - LosS_{trBC} - Fade_{rAC} \quad (4)$$

где $EIRPS_{BC}$ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) полезного сигнала на выходе излучающей антенны БС, дБВт; G_{tr} – ослабление сигнала передающей антенны в направлении получателя полезного сигнала по сравнению с максимум излучения, дБ; KU_{rAC} – коэффициент усиления антенны приемника АС, дБи; A_{rAC} – коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника АС, дБ; $LosS_{trBC}$ – медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БС, дБ; $Fade_{rAC}$ – запас на замирание сигнала АС, дБ.

5. Формула для расчета зоны обслуживания БС в обратном направлении (к приемнику БС) (S_{rBC}):

$$S_{rBC} = EIRPS_{AC} - G_{rt} + KU_{rBC} - A_{rBC} - LosS_{trAC} - Fade_{rBC} \quad (5)$$

где $EIRPS_{AC}$ – ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны, дБВт; G_{rt} – ослабление сигнала приемной антенны в направлении источника полезного сигнала по сравнению с максимум излучения, дБ; KU_{rBC} – коэффициент усиления антенны приемника, дБи; A_{rBC} – коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника, дБ; $LosS_{trAC}$ – медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала, дБ; $Fade_{rBC}$ – запас на замирание сигнала, дБ.

Алгоритм и формулы (1) – (5) совместно с разработанной автором Моделью применяются для компьютерного моделирования работы TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

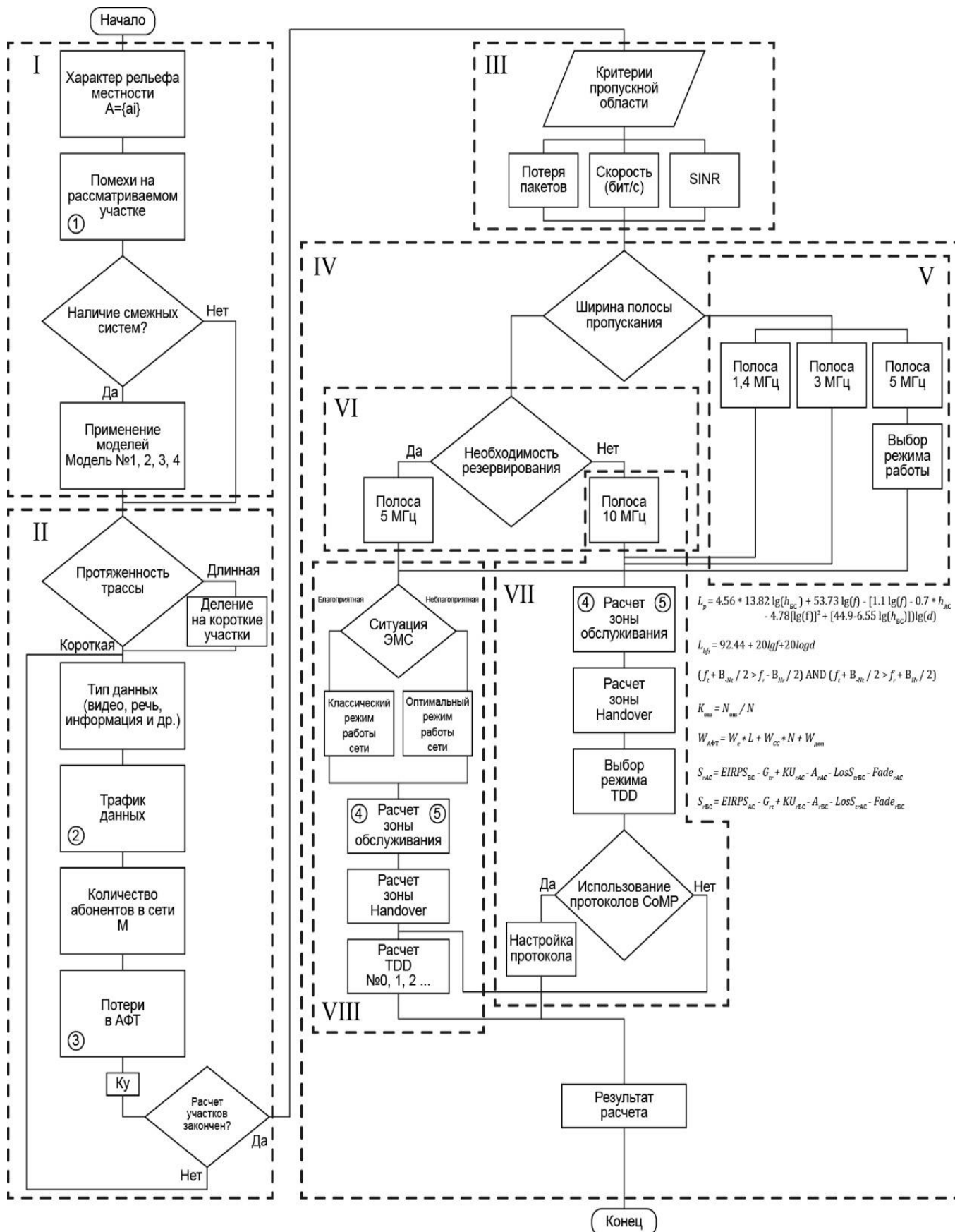


Рисунок 1 – Схема алгоритма методики использования частотного ресурса при проектировании TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ

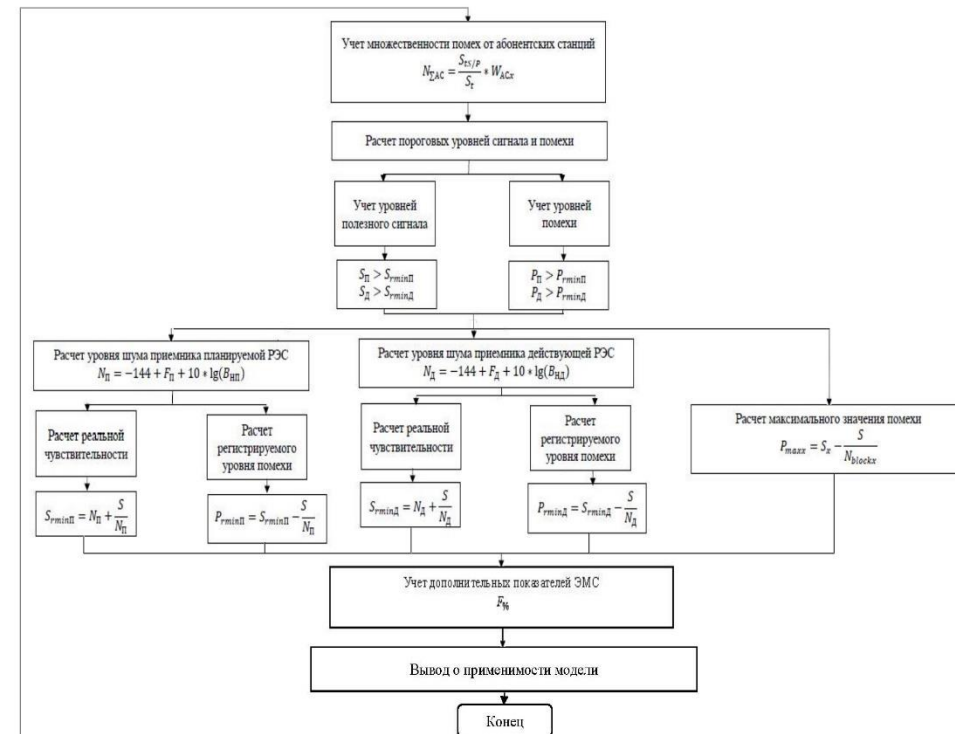
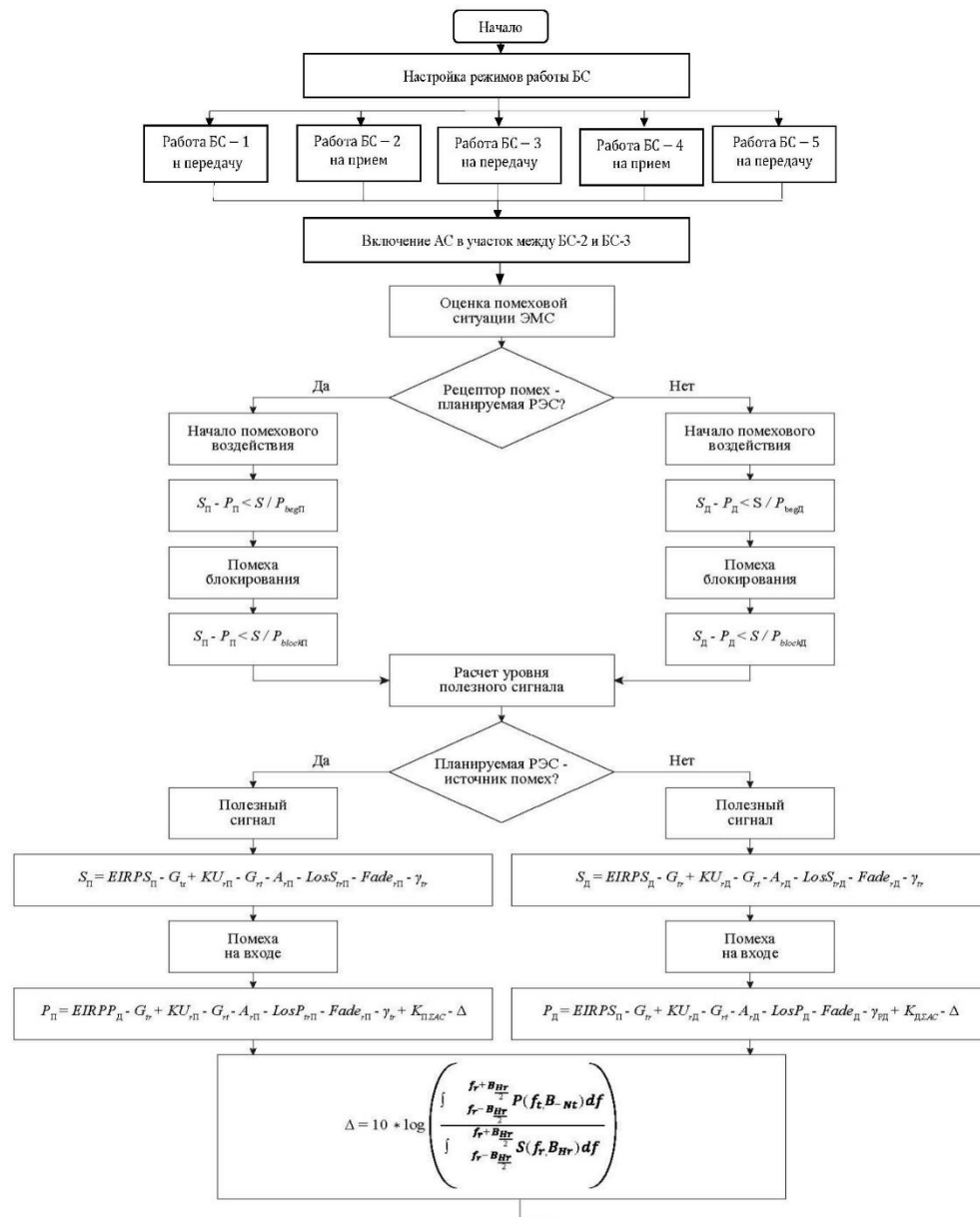


Рисунок 2 – Схема модели временной синхронизации режимов работы БС

Также решена задача оптимального распределения частот методом целочисленного линейного программирования (ЦЛП). При помощи компьютерного моделирования было получено следующее решение, представленное на рисунке 3:

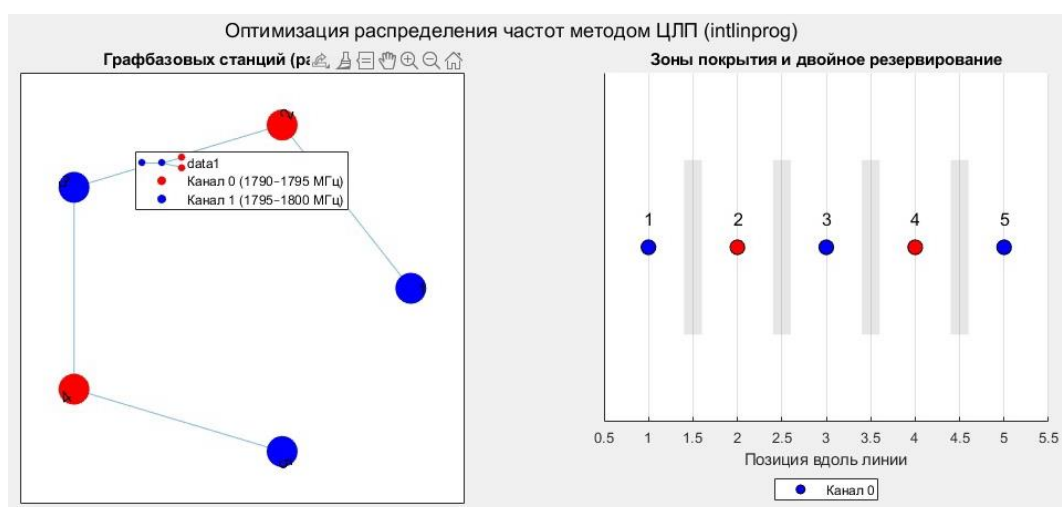


Рисунок 3 – Распределение частот методом целочисленного линейного программирования

Необходимо распределить имеющиеся частотные каналы в диапазоне 1790-1800 МГц (ввиду наличия защитных интервалов 5 МГц на концах спектра) между базовыми станциями. Каждая пара соседних станций не может использовать один и тот же канал (интерференция). Также необходимо обеспечить пропускную способность 2 Мбит/с по нисходящей линии и 1 Мбит/с по восходящей при обеспечении резервирования сети за счет двойного радиопокрытия. Требуется назначить каждой станции канал из заданного набора так, чтобы количество используемых каналов было минимальным, тем самым оптимизируя использование спектра и снижая интерференцию, что освобождает спектр для других задач, упрощает планирование сети и уменьшает вероятность взаимных помех.

Задачу оптимального распределения методом ЦЛП математически можно описать следующей формулой (6):

$$\min \sum_{k=1}^K y_k \quad (6)$$

При ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K x_{i,k} &= 1, i = 1, \dots, N, \\ x_{i,k} + x_{j,k} &\leq 1, (i, j) \in E, k = 1, \dots, K, \\ x_{i,k} &\leq y_k, i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K, \\ x_{i,k} &\in \{0,1\}, y_k \in \{0,1\}. \end{aligned}$$

где N – количество базовых станций;

K – максимально доступное количество каналов;

E – множество пар станций, между которыми запрещено использовать одинаковый канал;

i, j – индексы базовых станций (нумерация станций);

k – индекс частотного канала (нумерация каналов).

Результаты внедрения Методики:

1. При рациональном применении предложенных моделей проектирования, снижены задержки автоматизированного управления сетью (распределение ресурсов TDD) в среднем на 25 %;

2. Увеличена зона обслуживания БС за счет исключения внутрисистемных помех, ограничивающих использование сигнально-кодовых конструкций с высокой спектральной эффективностью, при оптимальном режиме работы сети на 40%;

3. Использование ограниченного частотного ресурса в выделенной полосе частот 1785-1805 МГц.

4. Методика является основой для разработки компьютерных моделей ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ, применение которых повышает качество реальных ТСП.

В третьей главе разработана обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания (*далее – Модель, второе положение, выносимое на защиту*).

Назначение Модели: обеспечение требуемой скорости передачи, уровня сигнала, обеспечение ЭМС, непрерывности связи, обеспечение (или увеличение) зоны обслуживания БС в местах пересечения с другими сетями радиосвязи путём обоснованного выбора и реализации 4 (четырёх) способов применения разных номиналов ширины полосы частот (10 МГц, 5 МГц, 3 МГц и 1.4 МГц) для ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Состав Модели:

1. Схема выбора способа проектирования (рис. 4).

2. Схема алгоритма применения и взаимодействия компонентов Модели (рис. 5).

3. Формализованные рекомендации и усовершенствованные расчётные формулы для сокращения времени проектирования ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ в местах пересечения с другими сетями радиосвязи (рис. 5) и для компьютерного моделирования ТСП в интересах обоснованного выбора лучшего проекта:

3.1. Модель может работать в синхронном режиме при применении полосы частот 10 или 5 МГц (при 1 и 2 способах соответственно).

3.2. Применение 4-го способа, то есть ширины полосы частот в 1.4 МГц, позволит «разбивать» ТСП на группы частот, что обеспечивает лучшую ЭМС, при этом увеличится дальность радиосвязи, но будет наименьшая скорость передачи данных (рис. 4 и 5).

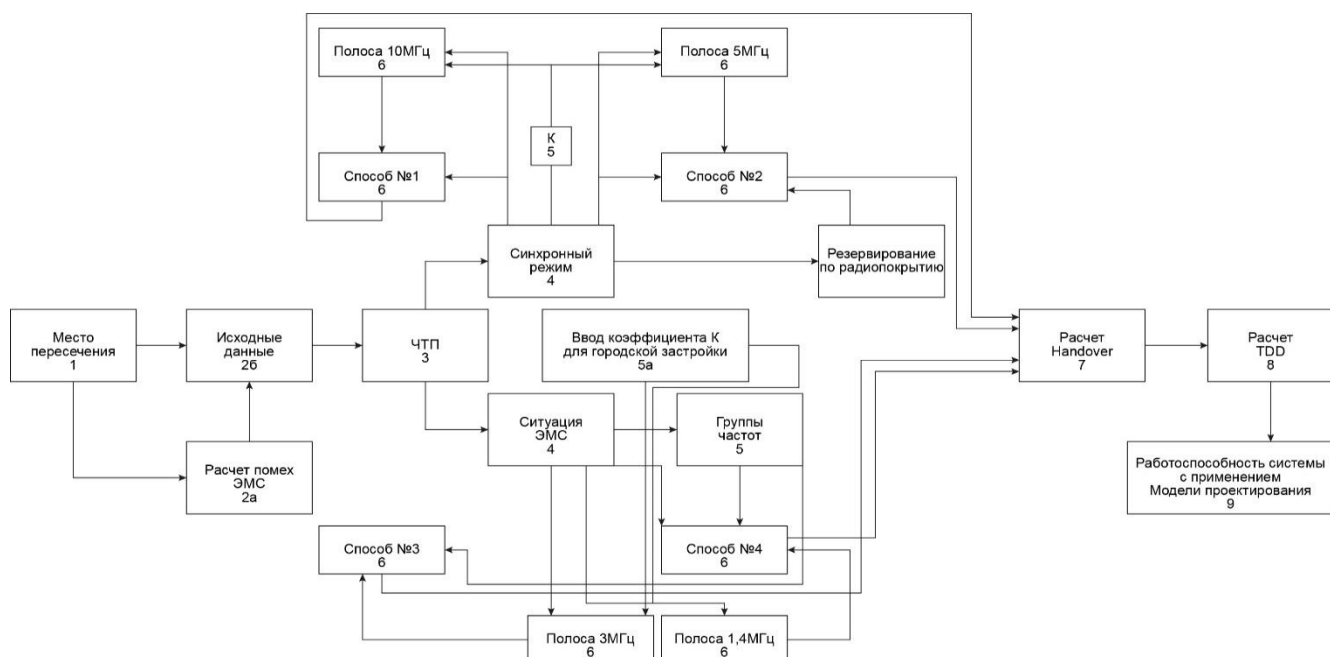


Рисунок 4 – Схема выбора способа проектирования

3.3. Для моделирования работы сети в диапазоне 1785 – 1805 МГц с шириной полосы 1.4 МГц (4 способ) применяются формулы:

3.3.1. Расчёт скорости передачи данных (7):

$$\vartheta_t = \frac{N_{PB} * N_{PE} * n}{t_{PB}} / 1000000, \text{ Мбит/с}, \quad (7)$$

где N_{PB} – количество ресурсных блоков; N_{PE} – количество ресурсных элементов; n – количество бит на символ; t_{PB} – продолжительность ресурсного элемента, с.

3.3.2. Скорость передачи данных для восходящей и нисходящей линий (8):

$$\vartheta = \vartheta_t * FEC * k, \quad (8)$$

где k – коэффициент, связанный с распределением субкадров TDD при различных вариантах; FEC – упреждающая коррекция ошибок.

3.3.3. Формула расчёта уровня сигнала для сигнально-кодовой конструкции. Уровень сигнала вычисляется формулой (9):

$$X = KTB + SINR + IM + NF, \text{ дБ}, \quad (9)$$

где KTB – мощность шума для полосы 1.4 МГц, дБм;

SINR – отношение сигнал/шум, дБ;

IM – запас на реализацию, дБ;

NF – коэффициент шума, дБ.

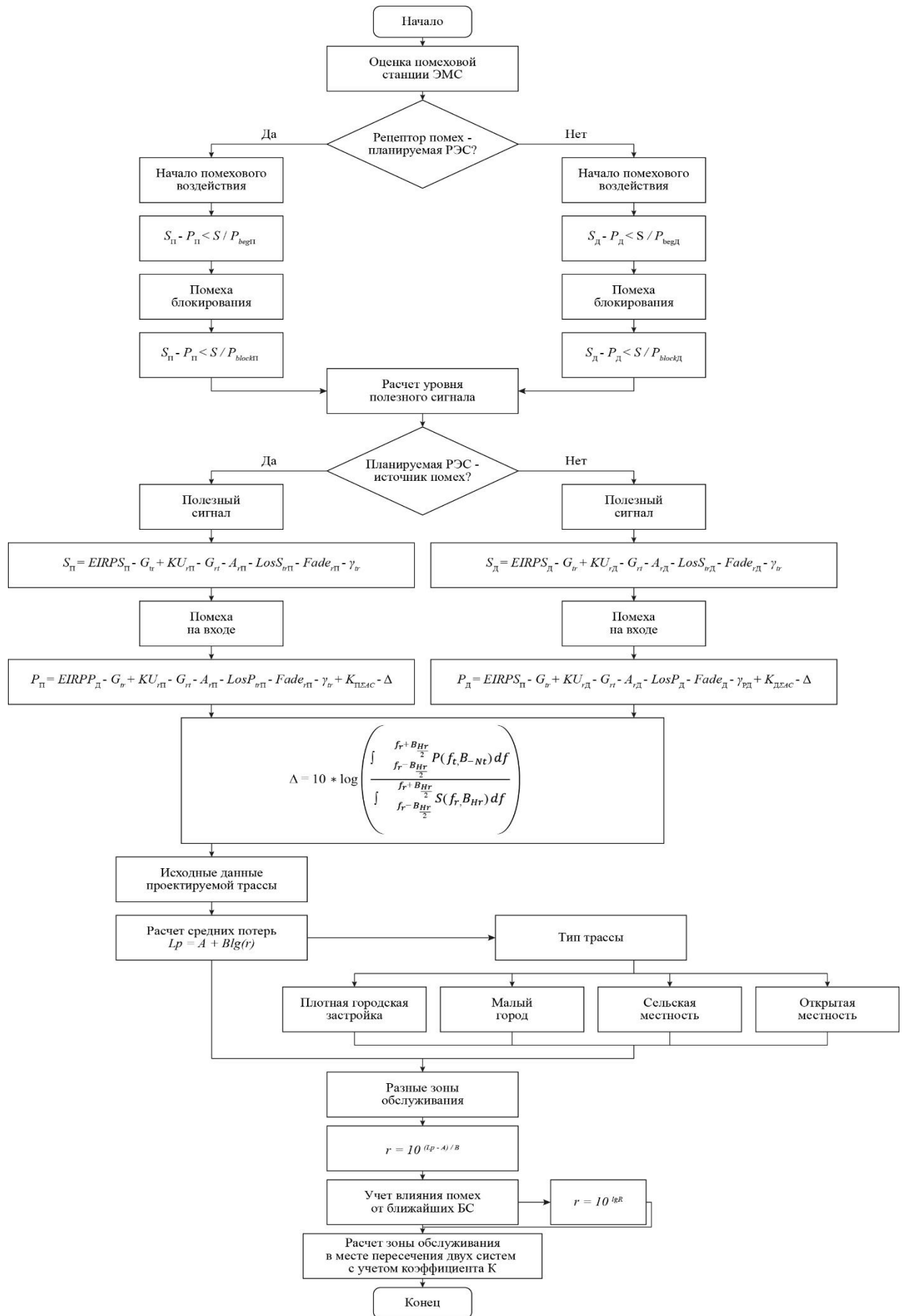


Рисунок 5 – Схема алгоритма применения и взаимодействия компонентов Модели

3.3.4. Дальность радиосвязи в зависимости от выбранного способа проектирования рассчитывается по формулам (10) и (11).

$$\lg R = (10P_{\text{п}} + 30 - \alpha_{\text{пер}} - l * \alpha_l + K_y - 69.55 - 26.16 \log f_{\text{нес}} + 13.82 h_{\text{БС}} + a(h_2) + 2^{\log \frac{f_{\text{нес}}}{28}} + 5.4 - K - A * D - P_{\text{пор}} + K_y) / (44.9 - 6.55 \log h_{\text{БС}}), \quad (10)$$

$$r = 10^{\lg R} \quad (11)$$

где:

$P_{\text{п}}$ – мощность передатчика, Вт;

$\alpha_{\text{пер}}$ – затухание передающего тракта, дБ;

l – длина фидера, м;

α_l – затухание фидера, дБ/м;

K_y – коэффициент усиления антенны, дБи;

$f_{\text{нес}}$ – несущая частота, МГц;

$h_{\text{БС}}$ – высота подъема антенны, м;

K – поправочный коэффициент (в зависимости от ширины полосы частоты), дБ;

A – затухания, включающие потери на свободное пространство, потери в кабеле, потери при подключении антенн, дБ;

D – расстояние между приемником и передатчиком (с учетом рельефа местности), км.

3.4. Применение полосы частот в 1.4 МГц (4 способ) обеспечивает скорость передачи данных до 2 Мбит/с на линии «вниз» и до 1 Мбит/с на линии «вверх».

3.5. Таким образом, в местах пересечения двух смежных радиосетей стандарта LTE-1800 TDD, работающих в одном диапазоне частот, целесообразно переходить на работу в полосу частот шириной 1.4 МГц с применением Модели при реализации 4 способа или в полосу с шириной 5 МГц, но только при применении синхронного режима работы ТСП, в необходимых случаях.

Результаты внедрения Модели: сокращение времени проектирования ТСП LTE-1800 TDD в среднем на 12% за счет выбора способа проектирования, скорректированного ограничениями по пропускной способности, без затрат дополнительных ресурсов.

В четвертой главе разработаны научно-технические предложения и решения по проектированию технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях (*далее – НТП, третье положение, выносимое на защиту*).

1. Первое НТП. Способ компенсации негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных магистралях (*далее – Способ*) состоит в проведении заблаговременного инициирования процедуры хендвера за несколько секунд до прохода поездом основной (сигнальной) базовой станции (рис. 6).

При движении поезда значение доплеровского сдвига будет медленно изменяться от 0 до 833 Гц, в зависимости от скорости движения состава (рис. 6).

Результаты внедрения Способа: снижение затрат на оборудование для ТСП LTE-1800 TDD на 17% за счет отказа от дополнительного оборудования (фильтров локомотивных радиостанций) при обеспечении непрерывности радиосвязи.

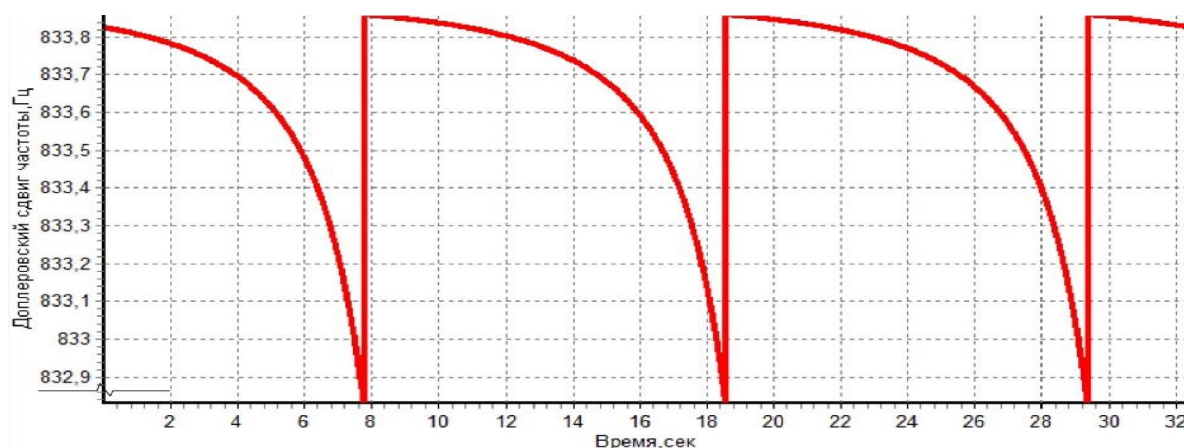


Рисунок 6 - График изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хендвера за 3 сек до прохождения поездом очередной БС (частота 1800 МГц).

2. Второе НТП по применению технологии MIMO для увеличения зоны обслуживания БС при проектировании TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

Предлагается взамен обычных узконаправленных антенн применять фазированные антенные решетки MIMO, типа TK11-506R, в конфигурациях 2T2R на линии «вниз» и 1T2R на линии «вверх», увеличивающие дальность обслуживания БС с 700 м до 1000 м при энергетическом выигрыше в 3 (три) дБ.

3. Третье НТП по выбору оптимально применимой модели распространения радиоволн, рекомендованных Международным союзом электросвязи (МСЭ-R) (Okumura-Nata, Рекомендация P.1546, Рекомендация P.1812, ECC-33), для проектирования TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

На основании анализа внедрения результатов диссертационного исследования и результатов анализа 3 (трех) моделей распространения радиоволн, рекомендуемых Международным союзом электросвязи МСЭ-R (Рекомендация P.1546, Рекомендация P.1812, Модель Okumura-Nata), предлагается для полного учёта всех условий проектирования (рельеф местности, напряженность поля и др.) комплексное применение модели P.1812 и разработанных автором Методики и Модели, а также усовершенствованных формул расчётов потерь передачи сигнала в зависимости от типа трассы (Рекомендации МСЭ-R).

4. Четвертое НТП по применению базы данных для расчета дальности радиосвязи по моделям проектирования технологических сетей радиосвязи.

Предлагается применять разработанную и зарегистрированную базу данных (далее – БД) №2025622894 для расчета дальности радиосвязи в TCP LTE-1800 TDD на ВСЖМ, а также в других технологических сетях.

Данная БД является научно-технической основой для создания сетей телекоммуникаций (рис. 7).



Рисунок 7 – Алгоритм расчета дальности радиосвязи БД №2025622894.

Результаты внедрения НТП:

1. Для организации работы ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ при скоростях свыше 400 км/ч установлено, что без компенсации эффекта Доплера возможна работа лишь при модуляции QPSK.

2. В случаях модуляции 16QAM и 64QAM по результатам математического и компьютерного моделирования определено, что угол поворота сигнального созвездия выходит из зоны допустимых значений из-за возникновения эффекта Доплера, негативно влияющего на работу ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ.

3. Увеличение дальности радиосвязи БС при использовании технологии ММО с 700 м до 1000 м, то есть в среднем на 300 м.

Основные результаты работы приведены в **заключении**.

Приложение А. Примеры расчетов скорости передачи данных и код программы.

Приложение Б. Акты внедрения и свидетельства о государственной регистрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказано, что в современных условиях проектирование ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ является актуальной задачей и вносит значительный вклад в развитие и совершенствование ТСП железнодорожного транспорта Российской Федерации, как важнейшей отрасли экономики.

Для обеспечения и повышения эффективного функционирования ТСП был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, а также моделирование работы сети.

2. Для обоснования постановки задачи исследования на разработку и внедрение методики, моделей и НТП выполнены анализ предметной области, анализ методологического аппарата, а также уточнение понятийного аппарата. Установлены ограничения и допущения для разработки методики, моделей и НТП по развертыванию ТСП LTE-1800 TDD на ВСЖМ с учетом специфики функционирования железнодорожного транспорта.

3. Разработана и внедрена методика использования частотного ресурса при проектировании технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях, а также модель временной синхронизации режимов работы базовых станций, обеспечивающая повышение внутрисистемной ЭМС за счет нейтрализации внутренних помех в диапазоне

частот 1785-1805 МГц в интересах обеспечения связи на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

4. Разработана и внедрена обобщенная модель технологической сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях и других сетей связи в совместных зонах обслуживания, обеспечивающая увеличение площади зоны устойчивой радиосвязи и улучшение ЭМС. При компьютерном моделировании установлено, что для повышения эффективности применения частотного ресурса необходимо использовать полосу, шириной 1.4 МГц из набора частот, определенных Решением ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г.

5. Разработаны и внедрены научно-технические предложения и решения по проектированию TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ, обеспечивающие повышение эффективности использования выделенного частотного ресурса в полосе частот 1785-1805 МГц, а также снижение негативного влияния эффекта Доплера.

6. Оценка результатов внедрения Методики, Модели и НТП:

6.1 Научная задача исследования решена, так как разработка и внедрение Методики, Модели и НТП показала высокие результаты при применении в учебных и производственных процессах: сокращено время проектирования TSP LTE-1800 TDD в среднем на 12% без затрат дополнительных ресурсов; снижены задержки автоматизированного управления в среднем на 25 %; увеличена зона обслуживания БС на 40%. Цель диссертации достигнута. Гипотеза научного исследования подтверждена. Доказано, что Методика, Модель и НТП являются наиболее рациональным путем решения научной задачи исследования.

6.2. Методика, Модель и НТП обеспечивают комплексный и универсальный подход при проектировании TSP LTE-1800 TDD на различных объектах железнодорожного транспорта Российской Федерации.

7. Методика, Модель, НТП и рекомендации представляют собой комплекс новых научно обоснованных методологических, технических и технологических решений в области проектирования TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ, что вносит значительный вклад не только в развитие радиосвязи на железнодорожном транспорте, как важнейшей отрасли экономики Российской Федерации, но и формируют научно-методологический задел в области проектирования TSP LTE-1800 TDD для различных отраслей экономики страны.

8. Результаты диссертационного исследования рекомендуются для дальнейшего совершенствования проектирования TSP на ВСЖМ при переходе на стандарт FRMCS/5G, а также для перспективных TSP на основе технологии 6G.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации состоят в следующем:

- разработка модели проектирования с применением технологии SFN (одночастотная сеть) для TSP LTE-1800 TDD на ВСЖМ как одного из перспективных направлений дальнейшего повышения эффективности использования ограниченного частотного ресурса и при повышении требований к ЭМС;

- разработка динамического распределения ресурсов трафика и машинного обучения доверенного искусственного интеллекта по данным, полученным от телеметрии, при помощи интеграции с перспективными (разрабатываемыми) отечественными системами доверенного искусственным интеллектом;

- разработка концепции базы данных вариантов готовых проектов ТСР на железнодорожном транспорте, полученных по результатам компьютерного моделирования;

- создание моделей и методик проектирования технологических сетей радиосвязи на основе FRMCS/5G;

- разработка квалификационных требований, учебных программ, формирование и поддержание в актуальном состоянии информационных ресурсов, необходимых для подготовки высококвалифицированных кадров для проектирования, создания, эксплуатации и технического обеспечения ТСР железнодорожного транспорта;

- результаты диссертационного исследования в значительной степени масштабируются на высокоскоростной автомобильный транспорт, но с рядом ограничений и допущений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

1. **Лобеев, Д. П.** Оптимизация использования частотного спектра / А. Ю. Тараненко, А. А. Гриценко, Д. П. Лобеев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2025. – № 1. – С. 9-12.
2. **Лобеев, Д. П.** Методика использования частотного ресурса при проектировании железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD / Д. П. Лобеев // Первая миля. – 2025. – № 4. – С. 58-69.
3. **Лобеев, Д. П.** О способе компенсации влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов, А. А. Гриценко // Техника средств связи. – 2025. – № 2(170). – С. 65-75.
4. **Лобеев, Д. П.** Научно-технические предложения по планированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Век качества. – 2025. – № 2. – С. 301-312.
5. **Лобеев, Д. П.** Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта / Д. П. Лобеев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2025. – т. 22. – Вып. 3. – С. 712-721.
6. **Лобеев, Д. П.** Способы компенсации негативного влияния эффекта Доплера / Д. П. Лобеев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2025. – № 8. – С. 32-34.
7. **Лобеев, Д. П.** Применение комплекса моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта

стандарта LTE-1800 TDD / Д. П. Лобеев, А. А. Гриценко, К. З. Билятдинов // Век качества. – 2025. – № 3. – С. 183-197.

8. Лобеев, Д. П. Основы разработки и совершенствования моделей и алгоритмов проектирования сетей связи стандарта LTE-1800 TDD / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Электросвязь. – 2025. – № 10. – С. 72-77.

9. Лобеев, Д. П. Внедрение модели проектирования технологических сетей радиосвязи LTE-1800 TDD в зонах пересечения / Д. П. Лобеев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 4. – С. 36-45.

10. Лобеев, Д. П. О разработке и применении методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Труды учебных заведений связи. 2025. – Т. 11. – № 6. – С. 53-61.

11. Лобеев, Д. П. Результаты внедрения методики и моделей проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Д. П. Лобеев // Век качества. – 2025. – № 4. – С. 288-302.

12. Лобеев, Д. П. Модель сети технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2026. – № 1. – С. 82-90.

13. Лобеев, Д. П. Особенности методики и модели проектирования технологических сетей радиосвязи LTE-1800 TDD в условиях высокоскоростного движения / Д. П. Лобеев // Век качества. – 2026. – № 1. – С. 235-248.

В других изданиях

14. Лобеев, Д. П. Особенности организации радиоканала в цифровых сетях технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE. / Д. П. Лобеев, Д. Н. Роенков // 79-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвящённая Дню радио : сб. докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб., 2024. – № 1 (79). – С. 274-277.

15. Лобеев, Д. П. Пример модели планирования цифровой сети технологической радиосвязи в стандарте LTE-1800 TDD / Д. П. Лобеев // Радиолокация, навигация, связь : сб. трудов XXXI Международной научно-технической конференции. / Воронежский государственный университет. – Воронеж., 2025. – т. 2. – С. 285-289.

16. Лобеев, Д. П. О результатах исследования эффекта Доплера в интересах обеспечения устойчивой радиосвязи с высокоскоростными объектами. / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей специального назначения : сб. материалов IV Межвузовской научно-практической конференции. / Военная академия связи им. С.М. Будённого. – СПб., 2025. – С. 244-248.

17. Лобеев, Д. П. Снижение негативного влияния эффекта Доплера на высокоскоростных объектах. / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники : сб. материалов Всероссийской научной конференции. / Военная академия связи им. С.М. Будённого. СПб., 2025. – С. 72-76.

18. **Лобеев, Д. П.** Жизненный цикл радиотехнических систем технологической железнодорожной радиосвязи. / Д. П. Лобеев, Д. Н. Роевков // 78-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвящённая Дню радио : сб. докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб., 2023. – С. 258-260.
19. **Лобеев, Д. П.** О рациональном использовании частотного ресурса технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. / Д. П. Лобеев, К. З. Билятдинов // Цифровая парадигма информационно-аналитического обеспечения учетных и финансовых процессов в отраслевых экономиках : сб. трудов Международного симпозиума. / Петербургский государственный университет путей сообщения. – СПб., 2025. – С. 74-77.
20. **Лобеев, Д. П.** О повышении эффективности использования частотного ресурса при использовании антенных решеток ММО. / Д. П. Лобеев // Теория и практика совершенствования отечественных систем связи, автоматизации и информационной безопасности : сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции. / Военная академия связи им. С.М. Будённого. – СПб., 2025. – том 2. – С. 305-309.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных

21. **Лобеев, Д. П.** Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623306 Российская Федерация. База данных для расчета дальности радиосвязи по моделям проектирования цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи: №2025622894: заявл. 28.07.2025: опубл. 08.08.2025 / Д. П. Лобеев.
22. **Лобеев, Д. П.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026660934 Российская Федерация. Распределение частот методом целочисленного линейного программирования: №2026619737: заявл. 09.04.2026: опубл. 16. 04.2026 / Д. П. Лобеев.