

На правах рукописи



Бушуев Сергей Валентинович

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ И ПРОВОЗНОЙ
СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИКИ

2.9.4 Управление процессами перевозок (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный консультант — ***Никитин Александр Борисович***,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Розенберг Ефим Наумович, доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт информатизации и связи на железнодорожном транспорте», г. Москва;

Долгий Игорь Давидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), г. Ростов-на-Дону;

Сидоренко Валентина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва.

Ведущая организация:

АО «Институт экономики и развития транспорта», г. Москва.

Защита диссертации состоится «03» апреля 2025 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 44.2.004.05 на базе ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, ауд. 7-320.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО РГУПС (www.pgups.ru). Автореферат размещен на сайте Минобрнауки России (vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просим направлять в адрес ученого совета университета.

Автореферат диссертации разослан «26» декабря 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
44.2.004.05, д.т.н., доцент



Новичихин Алексей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Пункт 21 «е» приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации ставит задачу обеспечить «связанность территории Российской Федерации за счет занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем». Решение этой задачи невозможно без роста объема перевозок по железной дороге и повышения скорости доставки груза. Проблема заключается в том, что изменение направления грузопотоков и связанный с этим быстрый рост объемов перевозок привели к использованию пропускных способностей многих участков железных дорог на критически высоком уровне, не позволив в плановом порядке обеспечить требуемое развитие инфраструктуры: усиление тягового электроснабжения, строительство новых путей и современных систем электрической централизации и автоблокировки. Такие проекты требуют огромных инвестиций и реализуются на БАМе при государственной поддержке. С другой стороны, выполнение работ по развитию инфраструктуры требует резервов пропускной способности для подвоза строительных материалов и технологических окон, которых недостаточно даже на обеспечение необходимого объема капитального ремонта пути.

Отсюда возникает научная проблема определения наиболее эффективных и оперативных вариантов увеличения провозной и пропускной способности высокозагруженных направлений железных дорог, оценки и использования возможных резервов с учетом индивидуальных условий каждого участка и особенностей поездопотока.

Бурное развитие средств цифровой радиосвязи, микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), устройств безопасности и автоведения на локомотиве создали предпосылки по повышению пропускной способности за счет нового подхода «виртуальной сцепки» с минимальными затратами на развитие путей перегонов и станций. Также переход на эту технологию не требует длительных технологических окон на переключение и не блокирует выполнение планов перевозки. Поэтому с 2019 года начались экспериментальные поездки, и в 2023 году по технологии «виртуальной сцепки» было проведено более 35 тысяч пар грузовых поездов на полигоне протяженностью 5700 км. Первоначальная оценка эффекта 10–12 % увеличения пропускной способности за счет этой технологии, подтвержденная единичными опытными поездками, к сожалению, при массовом внедрении не достигается. Поэтому актуальным является исследование потенциальных и

реальных запасов пропускной способности технологии автоведения пакетов поездов в «виртуальной сцепке» и разработка методов их использования в условиях влияния эксплуатационных факторов. При этом необходимо учитывать возможности и особенности различных СЖАТ (электрической централизации и автоматической блокировки), уровень развития локомотивных систем безопасности и автоведения, а главное, техническое состояние пути и технологию работы участка железной дороги, включая станции.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в изучение вопросов пропускной способности участков железных дорог и технологии работы станций сделали ученые: Александров А.Э., Анисимов В.А., Бадах В.И., Бородин А.Ф., Бессоненко С.А., Козлов П.А., Кудрявцев В.А., Левин Д.Ю., Макарович А.М., Мехедов М.И., Осьминин А.Т., Сидоренко В.Г., Тимухина Е.Н. и другие.

Значительный вклад в развитие перегонных и станционных систем автоматики и телемеханики внесли ученые: Бестемьянов П.Ф., Воронин В.А., Гавзов Д.В., Долгий И.Д., Кокурин И.М., Никитин А.Б., Переборов А.С., Розенберг Е.Н., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Шаманов В.И., Шалягин Д.В. и другие.

Развитием локомотивных систем безопасности движения и автоведения занимались ученые: Абрамов В.М., Баранов Л.А., Головин В.И., Никифоров Б.Д. и другие.

Исследованием вопросов интервального регулирования движения поездов с применением радиоканала и другими вопросами, связанными с пропускной и провозной способностью, занимались зарубежные ученые: F. Flammini, S. Marrone, T. Dick, Shaofeng Lu, Jing Xun, Yafei Liu и другие.

Тем не менее, методы оценки потенциальных запасов и реальных резервов пропускной способности, с учетом накопленных данных в АСУ РЖД о движении потока поездов с высокой детализацией технологических процессов, недостаточно проработаны. Создание и расширение внедрения новой технологии организации движения поездов в режиме «виртуальной сцепки» требует проработки теоретических и практических аспектов ее эффективного использования.

Область исследований соответствует паспорту специальности 2.9.4 «Управление процессами перевозок (технические науки)», а именно п. 2. «Технология транспортных процессов, моделирование и совершенствование транспортных технологических процессов» и п. 6 «Системы и устройства автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, их эксплуатация, методы построения и испытания».

Объектом исследования является интервальное регулирование движения поездов на двухпутном участке железной дороги, в том числе с использованием специфической технологии автоведения пакетов поездов, так называемой «виртуальной сцепки».

Предметом исследования являются методы оценки провозной и пропускной способности двухпутных участков железных дорог и методы определения резервов пропускной способности за счет автоведения пакетов поездов и систем автоматики и телемеханики.

Цель исследования – повышение пропускной и провозной способности грузонапряженных (двухпутных) участков железных дорог за счет совершенствования стационарных и бортовых средств железнодорожной автоматики и телемеханики в зависимости от инфраструктурных, технических и технологических условий.

Задачи исследования:

1. Количественно оценить потенциальный эффект повышения провозной способности участков железных дорог основными возможными способами и определить роль технических средств автоматики (устройств автоведения локомотива и систем интервального регулирования) в увеличении этого показателя.

2. Разработать метод исследования запасов пропускной способности, опирающийся на большие данные автоматизированных систем управления ОАО «РЖД» и учитывающий возможности применяемых СЖАТ на локомотивах, перегонах и станциях.

3. На аналитических и имитационных моделях определить достигнутые значения и физические ограничения уменьшения межпоездных интервалов, разработать методы оценки и использования выявленных резервов пропускной способности.

4. Исследовать влияние критериев регулирования при автоведении поездов в режиме квазивиртуальной сцепки и систем автоматики на сокращение межпоездного интервала и предложить технические решения, гармонизирующие работу СЖАТ и автоведения поездов.

5. Провести комплексную оценку влияния «виртуальной сцепки» на пропускную способность участка железной дороги, выявить сдерживающие факторы роста пропускной способности и возможный экономический эффект применения этой технологии.

Научная новизна. В результате исследований впервые разработаны и представлены:

1. Обобщенная модель и оценка потенциальных запасов провозной способности двухпутного участка железной дороги в зависимости от нагрузки на ось, длины поезда, скорости, межпоездного интервала, норм времени на плановые ремонтные работы, а также надежности технических средств.

2. Впервые предложена классификация технологии виртуальной сцепки поездов по этапам приближения к целевому состоянию – движению на минимальной безопасной дистанции.

3. Метод исследования запасов пропускной способности, обусловленных применяемыми СЖАТ, основывающийся на интеграции больших данных автоматизированных систем управления ОАО «РЖД» с данными расчетных моделей.

4. Метод расчета и сравнения межпоездных интервалов, обеспечиваемых системой интервального регулирования движения поездов (СИР) с учетом всех действующих в эксплуатации факторов на участке железной дороги.

5. Результаты анализа критериев регулирования при автоведении поездов в режиме квазивиртуальной сцепки с точки зрения их влияния на пропускную способность участка железной дороги.

6. Метод определения длины разгонного пути в зависимости от интервала попутного отправления поездов, времени подготовки маршрута, уклона и массы поездов.

7. Способ попутного отправления поездов, обеспечивающий сокращение межпоездного интервала, при использовании радиоканала и ограниченной модернизации устройств СЖАТ (на станции и двух участках удаления).

8. Технические требования к системам «виртуальной сцепки» поездов, обоснованные результатами комплексной оценки изменения пропускной способности участка железной дороги, при массовом внедрении этой технологии.

Теоретическая значимость:

1. Обоснование наиболее перспективной совокупности методов повышения провозной и пропускной способности железных дорог с учетом современного технического и технологического уровня.

2. Разработан метод исследования запасов пропускной способности реальных участков железных дорог на основе интеграции данных ряда АСУ РЖД и расчетных моделей в единый синхронизированный и регуляризированный массив данных (OLAP-куб) поездной работы направления (участка) железной дороги.

3. Для систем автоведения в режиме квазивиртуальной сцепки доказана наибольшая эффективность критерия поддержания постоянного времени межпоездного интервала и определено влияние систем автоблокировки.

4. Взамен развивающегося подхода «Организация движения виртуально сцепленных поездов» предложено направление доработки систем автоведения с целью динамического формирования и расформирования пакета виртуально сцепленных поездов, обеспечивающее снижение межпоездного интервала без модернизации СИР.

5. Разработаны методы сокращения межпоездных интервалов и получены их численные оценки при попутном отправлении, в пути следования и прибытии поездов в режиме «виртуальной сцепки» с учетом реальных скоростей, силы тяги и тормозного коэффициента, путем ограниченной реконструкции станционных систем автоматики или строительства разгонного пути.

6. Разработана модель отправления поездов по разгонному пути, позволяющая определить его длину в зависимости от интервала попутного отправления, уклона пути, массы и скорости поездов, времени, необходимого для задания маршрута ведомому поезду.

Практическая значимость:

1. Классификация виртуальной сцепки поездов по этапам приближения к целевому состоянию – движению на минимальной безопасной дистанции.

2. База данных, полученная на основе интеграции показателей технологических процессов АСУ РЖД и расчетных моделей, позволяющая стандартными математическими методами обработки больших данных и машинного обучения исследовать широкий круг вопросов, влияющих на пропускную способность участка: тягу поездов, интервальное регулирование, энергопотребление, неоптимальное управление тягой и движением поездов.

3. Индикатор потери пропускной способности блок-участков автоблокировки на основе вероятности нарушения нормативного межпоездного интервала, позволяющий быстро выявить узкие места пропускной способности с точностью до рельсовой цепи на протяженных участках железных дорог.

4. Технические решения для микропроцессорной централизации МПЦ-МПК (ЦКЖТ.665211.010.Д9-ТР), позволяющие выполнять отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом попутного отправления, соответствующим интервалу двухблочного разграничения движения поездов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач применялись общенаучные методы: восхождения от абстрактного к конкретному, формализации, измерения и наблюдения за технологическими процессами, методы моделирования, в том числе статистические методы,

методы численного моделирования, машинного обучения, имитационного моделирования и методы нормализации данных (по структуре и масштабу). Использовались программные комплексы тяговых расчетов Магистраль-ТП, ИСКРА-ПТР, КОРТЭС, система макро моделирования транспортных узлов и полигонов ИМЕТРА, язык программирования Python и SQL, база данных PostgreSQL, в качестве источников данных АСУ ОАО «РЖД», в том числе ГИД-Урал, АСУТ-НБД2 и другие.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная модель провозной способности, доказывающая наличие больших потенциальных запасов приращения провозной способности при повышении скорости и снижении межпоездного интервала, чем за счет увеличения нагрузки на ось, массы и длины поезда с учетом реального характера грузопотока при заданном состоянии развития инфраструктуры.

2. Классификация виртуальной сцепки поездов по этапам приближения к целевому состоянию, конкретизирующая требования к системам автоведения, инфраструктуре СЖАТ и радиосвязи.

3. Способ создания базы данных «Поездная работа участка железной дороги», объединяющей данные нескольких автоматизированных систем управления ОАО «РЖД», обеспечивающий регуляризацию и мягкую синхронизацию данных о движении поездов в пространстве и времени, дополнение данными расчетных моделей с целью исследований пропускной способности, тяги поездов, работы СЖАТ и энергоснабжения.

4. Метод исследования запасов пропускной способности, опирающийся на интеграцию больших данных автоматизированных систем управления ОАО «РЖД» и расчетных моделей, позволяющий сравнивать достигнутые межпоездные интервалы с возможными, получаемыми в случае модернизации СИР с учетом действующих в эксплуатации факторов.

5. Результаты анализа критериев регулирования при автоведении поездов в режиме квазивиртуальной сцепки с точки зрения их влияния на пропускную способность участка железной дороги, определившие условия эффективного использования критериев регулирования и влияние СИР.

6. Метод определения необходимости строительства и длины разгонного пути на станции с целью обеспечения требуемого интервала попутного отправления в зависимости от инфраструктуры (ограничений скорости и уклона пути), характеристик поезда и локомотива и ограничения силы тяги.

7. Технические решения для систем электрической централизации, включающие правила расстановки сигналов в маршруте отправления и алгоритмы работы ЭЦ, позволяющие выполнять попутное отправление поездов

при автоведении пакетов поездов, для реализации движения по сигналам трехзначной автоблокировки с двухблочным разграничением.

8. Результаты имитационных экспериментов по определению роста пропускной способности полигона железной дороги в результате массового внедрения квазивиртуальной сцепки с интервалом следования 5 минут, доказывающие возможность роста пропускной способности на 10 % исключительно за счет этой технологии с возможностью дальнейшего увеличения за счет усиления ограничивающих пропускную способность пунктов технического осмотра (ПТО).

Степень достоверности результатов подтверждается логичным построением процесса исследования, корректным использованием математических методов, верификацией и валидацией моделей разными методами (графоаналитическим, логическим контролем хода технологических процессов, аналитическим поиском выбросов данных, установлением причин и исключением «сбойных» участков, совпадением расчетных данных с фактически измеренными в ходе реализации технологических процессов).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на 34 международных и всероссийских конференциях, совещаниях и технических советах, начиная с 2006 года. Ниже приведены основные публичные мероприятия за последние 5 лет:

- «V Всероссийский симпозиум по региональной экономике». Институт экономики УрО РАН, 10.10.2019 г., г. Екатеринбург;
- «Транспорт Урала – 2019». Всероссийская научно-техническая конференция. 5 декабря 2019 г., г. Екатеринбург;
- «Проблемы безопасности на транспорте». X Международная научно-практическая конференция. 2020 г., г. Гомель, Беларусь;
- «Транспорт Урала – 2020». Всероссийская научно-техническая конференция. 17 ноября 2020 г., г. Екатеринбург;
- «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transport and technologies, RTT-2021)». Международная научно-практическая конференция. 24–25 ноября 2021 г., г. Екатеринбург;
- «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление». Международная научно-практическая конференция. 17 марта 2022 г., г. Екатеринбург;
- «Безопасность движения поездов». XXI Всероссийская научно-практическая конференция. 19–20 мая 2022 г., г. Москва;

– «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transport and technologies, RTT-2022)». Международная научно-практическая конференция. 29–30 ноября 2022 г., г. Екатеринбург;

– «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление». Международная научно-практическая конференция. 18 мая 2023 г., г. Екатеринбург;

– «Безопасность движения поездов». XXII Всероссийская научно-практическая конференция. 26.10.2023, г. Москва, РУТ-МИИТ.

– «Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии» (DTI-2023). V Международная конференция. 27.10.2023 г., г. Екатеринбург;

– «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transport and technologies, RTT-2023)». Международная научно-практическая конференция. 29–30 ноября 2023 г., г. Екатеринбург;

– заседание Комитета ОПЖТ по разработке и внедрению электротехнических и интеллектуальных систем управления и обеспечения безопасности. XIV Чебоксарский экономический форум «Чувашия: устойчивое развитие». 20–21 июня 2024 г., г. Чебоксары.

Личный вклад автора. Все результаты первой, второй и третьей глав получены автором лично. Модель отправления и приема виртуально сцепленных поездов и технические решения для ЭЦ разрабатывались под руководством автора совместно с аспирантом Голочаловым Н.С. Идея указанной модели и технических решений, интерпретация результатов моделирования отправления поезда, модели движения пакета поездов и результаты 4 главы получены автором лично. В 5 главе имитационная модель реального участка железной дороги в системе ИМЕТРА разработана совместно с группой ученых научной школы д. т. н., профессора Козлова П.А. Планирование и проведение имитационных экспериментов, анализ результатов, исследование естественного образования пакетов в моделируемом потоке поездов и на реальном участке, оценка влияния технологии «виртуальной сцепки» при динамическом образовании пакетов поездов на пропускную способность выполнялись лично автором.

Публикации. По теме исследования опубликована 51 печатная работа, в том числе 26 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 4 в изданиях, проиндексированных в SCOPUS и входящих в ядро РИНЦ, 2 патента, 1 свидетельство о регистрации базы данных, 17 прочих публикаций в рецензируемых журналах, 1 монография.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 364 страницах, содержит 332 страницы основного текста, 112 рисунков, 48 таблиц и 4 приложения на 32 страницах. Список литературы включает 245 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы исследования, степень ее разработанности, формулируются объект, предмет, цель и задачи исследования, приводится научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, излагаются основные положения, выносимые на защиту, сведения по апробации и степени достоверности результатов исследования.

В первой главе приводится анализ способов решения проблемы повышения провозной способности участков железных дорог за счет увеличения массы поезда (длины, погонной загрузки вагонов, снижения сопротивления движению) или пропускной способности (путевое развитие, увеличение скоростей движения, уменьшение межпоездных интервалов, совершенствование технологии организации движения). Технические средства автоматики в первую очередь влияют на скорость движения и межпоездные интервалы, а значит, позволяют увеличивать провозную способность за счет увеличения пропускной способности.

Быстроразвивающимся новым направлением повышения пропускной способности является применение технологии так называемой «виртуальной сцепки» поездов. Виртуальная сцепка является высокотехнологичным развитием технологии жесткой сцепки поездов с целью увеличения провозной способности. Отсюда следует, что виртуальная сцепка – это ведение пакета поездов на минимальной безопасной дистанции с использованием радиосвязи и учетом физических свойств пути, подвижного состава и технических систем, обеспечивающих эту технологию. В этом случае минимальной безопасной дистанцией будем считать минимальное расстояние, исключающее столкновение с впередиидущим поездом при использовании служебного торможения.

Низкая точность позиционирования локомотива, хвоста поезда и применение СИР на основе рельсовых цепей требует значительного увеличения дистанции между последовательно движущимися поездами, превращая технологию в квазивиртуальную сцепку, которая обладает меньшей эффективностью, но все же дает определенный рост пропускной способности

участков железных дорог, что обеспечивает целесообразность поэтапного сокращения дистанции между поездами в пакете.

Введем классификацию этапов приближения технологии ведения пакетов поездов к виртуальной сцепке:

ВСЦ0 – нулевой этап приближения – режим ручного управления ведомым поездом в пакете из двух поездов на дистанции не менее двух блок-участков трехзначной автоблокировки, машинист управляет поездом под контролем системы безопасности (САУТ, КЛУБ, БЛОК и т. п.) с возможностью следовать со скоростью 80 км/ч под желтый сигнал светофора, на основании дополнительной информации локомотивной системы управления о дистанции до впередиидущего поезда и режиме его ведения.

ВСЦ1 – первый этап – когда ведомый поезд управляется системой автоведения на участке, оборудованном системой автоблокировки, которая обеспечивает безопасность, с разрешением движения на желтый сигнал светофора со скоростью 80 км/ч «под кривой скорости прицельного торможения» локомотивной системы безопасности.

ВСЦ2 – второй этап – когда ведомый поезд управляется системой автоведения на дистанции не менее тормозного пути служебного торможения на участке, оборудованном системой автоблокировки с подвижным блок-участком или радиоблокировки.

ВСЦ3 – третий этап – виртуальная сцепка. Ведомый поезд управляется системой автоведения на минимальной дистанции, обеспечивающей безопасное служебное торможение в случае экстренного торможения впередиидущего поезда. В этом случае СЖАТ не должны влиять на движение ведомого поезда, весь пакет виртуально сцепленных поездов должен рассматриваться как один соединенный поезд.

В диссертационной работе рассматривается применения ВСЦ0, ВСЦ1 и ВСЦ2 для повышения пропускной способности участков железных дорог в сравнении с другими известными методами повышения пропускной и провозной способности.

Предложенная обобщенная аналитическая модель провозной способности, записанная в относительных единицах (1), показывает, что за счет сокращения интервала при применении ВСЦ0-ВСЦ1 возможен рост пропускной способности до 35 % (рисунок 1).

$$\Gamma_{\text{отн}} = \frac{V \cdot L_{\text{п}}}{L_{\text{п}} + L_{\text{р}}} \cdot \frac{K_{\text{нт}} \cdot m_{\text{в}} \cdot n_{\text{осв}}}{l_{\text{в}}} \cdot (1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}} / \Gamma_0, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{отн}} = \Gamma / \Gamma_0$ – относительная провозная способность (Γ – суточная провозная способность для новых условий движения; Γ_0 – провозная

способность при исходных условиях и трехзначной автоблокировке); $L_{\text{п}}$ – длина поезда; $L_{\text{р}}$ – разграничивающее поезда расстояние в зависимости от СИР; V – скорость поезда, кроме статических условий участка, учитывает также безопасное расстояние для соблюдения $L_{\text{р}}$; $l_{\text{в}}$ – средняя длина вагона; $K_{\text{нт}}$ – коэффициент отношения массы вагона нетто к брутто; $m_{\text{в}}$ – нагрузка на ось; $n_{\text{осв}}$ – число осей в вагоне; $\frac{m_{\text{в}} \cdot n_{\text{осв}}}{l_{\text{в}}}$ – погонная нагрузка вагона; 1440 – количество минут в сутках; $t_{\text{тех}}$ – время технологических окон; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий роль надежности устройств в снижении пропускной способности.

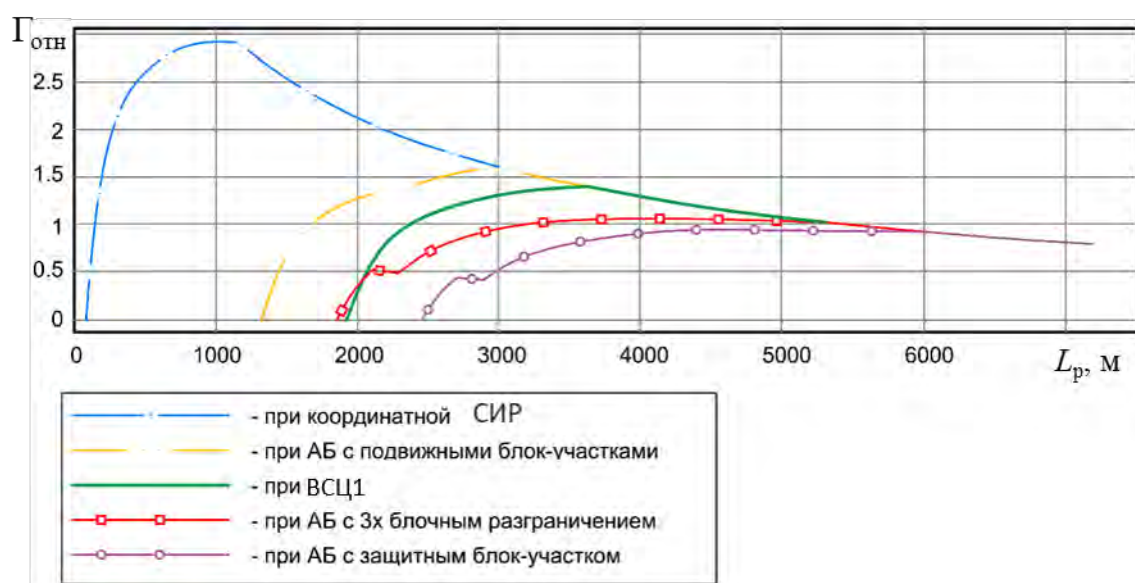


Рисунок 1 – Относительная провозная способность в зависимости от разграничивающего расстояния между поездами в потоке с учетом ограничения скорости при насыщении участка

Дополнительные возможности открывает автоведение в части увеличения технической скорости за счет оптимизации ведения с обеспечением максимального использования разрешенной скорости движения. Оценки потенциальных возможностей повышения провозной способности участка с учетом особенностей потока грузов и поездов, реализации СИР (таблица 1) показывает, что наиболее перспективно в ближайшие годы развитие пропускной способности за счет виртуальной сцепки ВСЦ1, причем эффект может быть сопоставим со строительством третьего пути, но при меньших капитальных затратах.

Однако потенциально возможный эффект ограничивается не только возможностями системы энергоснабжения, методы усиления которой не

рассматриваются в диссертационной работе, но и особенностями применения СЖАТ, организации движения на участке, технологическими операциями на станциях, отказами технических средств, ограничением скорости по состоянию или при техническом обслуживании инфраструктуры (таблица 1, колонка «Экспертная оценка»).

Таблица 1 – Обобщенные результаты оценки способов повышения провозной способности

Способ повышения провозной способности	Оценка резерва повышения провозной способности	
	Обобщенная модель	Экспертная оценка
Повышение надежности	до 4 %	от 0 до 0,01 %
Снижение нормы времени на текущий ремонт и обслуживание	до 11 %	от -5 % до 0 %
Увеличение нагрузки на ось до 30 т	до 28 %	не более 0,5 %
Увеличение погонной нагрузки вагона за счет увеличения объема, конструкции сочлененного типа и снижения веса тары	от 20 до 40 %	не более 0,5 %
Увеличение доли тяжеловесных и соединенных поездов	до 40 %	до 3 %, в случае сплошного удлинения путей до 25 %
Использование разрешенной скорости	до 33 %	до 20 % (автоведение)
Сокращение межпоездного интервала	до 35 %	до 20 % за счет автоведения пакетов поездов

Поэтому во **второй главе** разработан метод исследования пропускной способности железнодорожного направления на основе больших данных АСУ «РЖД», в частности ГИД-Урал, АСУТ-НБД2, ЕК-АСУИ, путем построения OLAP-кубов поездной работы участка железной дороги. Особенностью метода является использование высокой детализации информации о движении поезда за счет данных локомотивных регистраторов САУТ и МПСУиД, мягкой синхронизации этих данных между собой и с информацией о параметрах поезда, информацией об инфраструктуре, условно-постоянных и временных ограничениях скорости с последующей регуляризацией в пространстве с шагом 50 м и времени с шагом 1 с, разметкой технологических ситуаций и наполнением полученного OLAP-куба вариантами их развития через расширение размерности на основе аналитических и имитационных моделей.

В результате появляется возможность визуализировать (рисунок 2) и анализировать технологические процессы в различных разрезах стандартными математическими методами, в том числе методами статистики и машинного обучения, с большей степенью детализации в пространстве и времени.

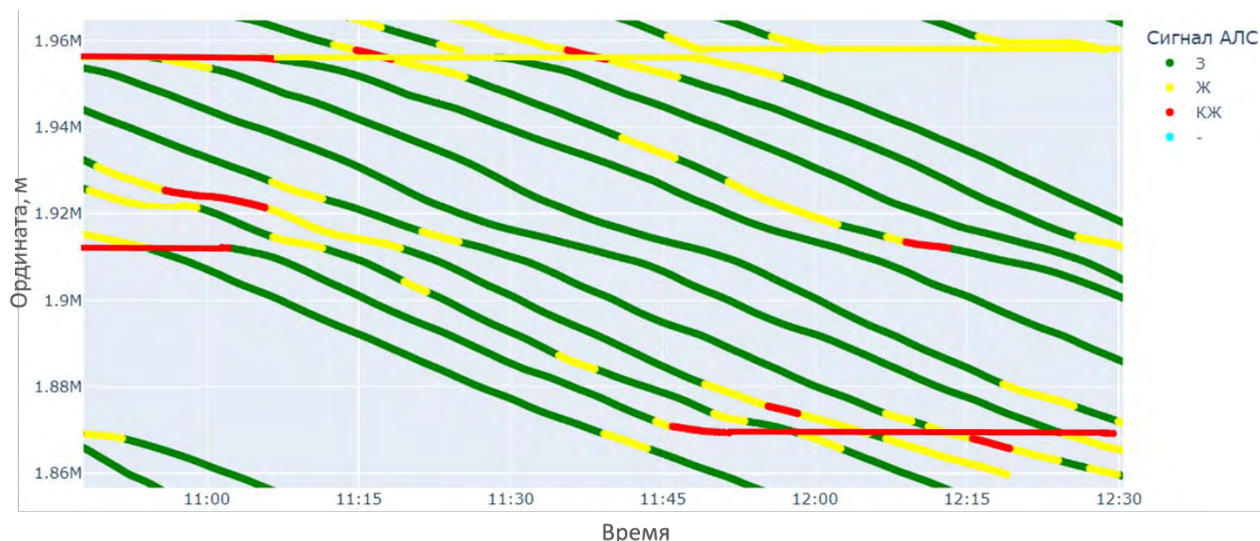


Рисунок 2 – ГИД нечетного направления движения (сетка 50 м, 1 с)

Критерием качества сформированного массива выбрана погрешность позиционирования поезда, которая составила ± 70 м, при этом существует систематическая погрешность регистрации параметров технологических процессов, например для ординаты светофоров $+80$ м по ходу движения, но этой точности достаточно для решения задач интервального регулирования.

С целью отработки методов анализа технологических процессов движения потока поездов на направлении железной дороги создана реляционная база данных поездной работы участков железной дороги.

В третьей главе разработана имитационная модель межпоездных интервалов с учетом реальных условий эксплуатации в случае применения различных СИР.

На границе каждой рельсовой цепи участка вычисляется минимальный межпоездный интервал с учетом правил СИР и кривой скорости (расчетной или фактической):

$$I_{n,j,\text{СИР},v_j} = \sum_{i=1}^{x_{\text{СИР}}(v_j)} t_{n,j,i}^{\text{РЦ}} + t_{n,j}^{\text{ОСВ}}, \quad (2)$$

где $I_{n,j,x_{\text{СИР}}(v_j)}$ – интервал j -го поезда, вычисляется для каждого блок-участка автоблокировки с номером n при заданной СИР и кривой скорости движения; $t_{n,j,i}^{\text{РЦ}}$ – время проследования j -м поездом i -го блок-участка впереди при $x_{\text{СИР}}(v_j)$ разграничивающих рельсовых цепей (РЦ) при нахождении на блок-участке с номером n ; $x_{\text{СИР}}(v_j)$ – дискретная функция количества разграничивающих блок-участков в зависимости от скорости движения поезда и алгоритма СИР; $t_{n,j}^{\text{ОСВ}}$ – время освобождения n -го блок-участка j -м поездом.

Фактический минимальный межпоездной интервал $I_{j\text{факт}}$ для каждого j -го поезда в потоке определяется максимальным из рассчитанных по формуле (2) в пределах последовательного движения поезда от РЦ с номером m до k :

$$I_{j\text{факт}} = \max_{n \in [m, k]} (I_{n, j, x(v_j)}). \quad (3)$$

Теперь можно прогнозировать вероятность нарушения межпоездного интервала для заданного типа СИР с учетом всех действующих на участке факторов (рисунок 3). Например, при организации движения с применением квазивиртуальной сцепки (этап ВСЦ1) на исследуемом участке вероятность того, что минимальный межпоездной интервал не превысит 7 минут 50 секунд, равна 0,9.

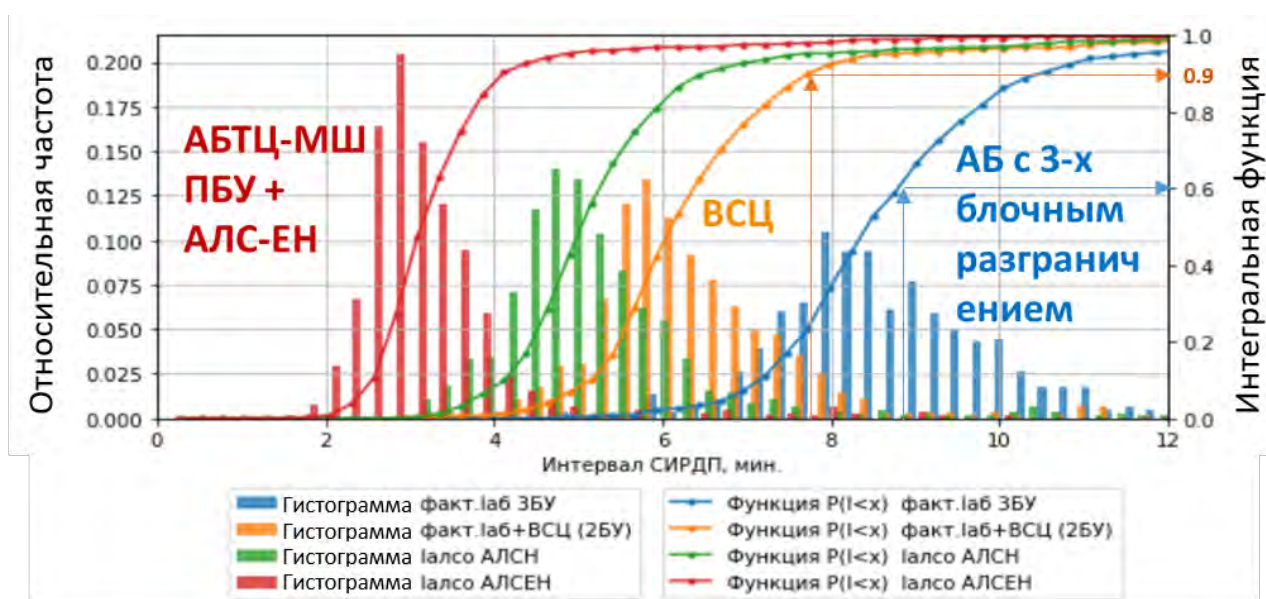


Рисунок 3 – Распределение минимальных межпоездных интервалов под влиянием всех действующих в эксплуатации факторов

Для выявления узких мест интервального регулирования с точностью до блок-участка АБ предложен индикатор (4): вероятность нарушения нормативного межпоездного интервала менее 1 % – зеленый цвет; вероятность нарушения в интервале от 1 % до 10 % – желтый цвет; более 10 % – красный.

$$Clr_n = \begin{cases} \text{зеленый, } P\{I_{j,n \text{ факт}} > I_{\text{норм}}\} < 1\% \\ \text{желтый, } 1\% \leq P\{I_{j,n \text{ факт}} > I_{\text{норм}}\} < 10\%, \\ \text{красный, } 10\% \leq P\{I_{j,n \text{ факт}} > I_{\text{норм}}\} \end{cases} \quad (4)$$

где Clr_n – color – цвет индикатора блок-участка n , $I_{j,n}$ факт – фактический межпоездной интервал j -го поезда на блок-участке n , $I_{норм}$ – нормативный (лимитирующий) межпоездной интервал участка.

Для сравнения приведем на одном рисунке значения индикатора для каждого из четырех вариантов СИР и график средней скорости поездов на каждой рельсовой цепи исследуемого участка (рисунок 4), из которого видно, что средняя скорость движения существенно снижается на участковых и технических станциях участка, но в некоторых случаях это удается компенсировать уменьшением длин блок-участков автоблокировки.

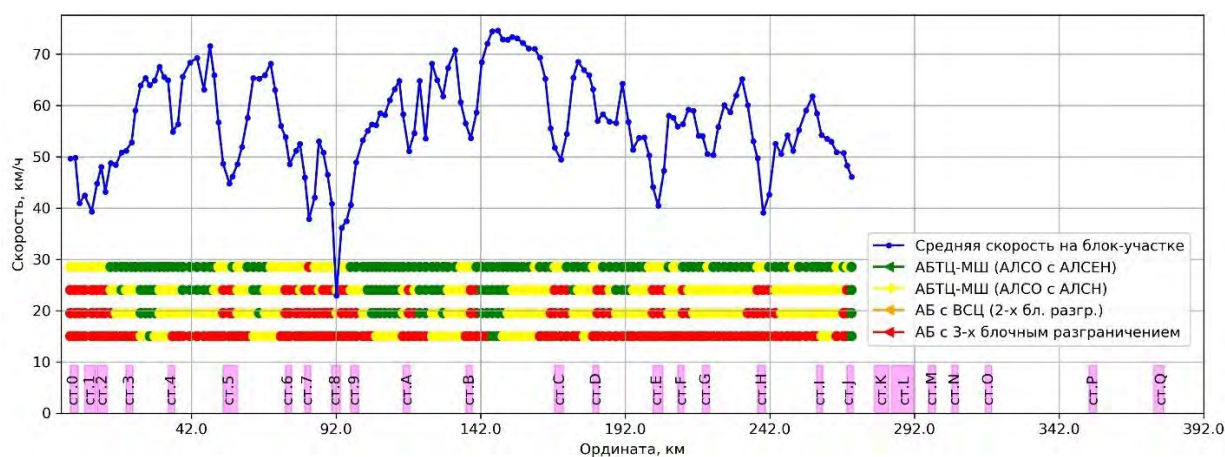


Рисунок 4 – Индикатор вероятности потерь пропускной способности участка железной дороги

Таким образом, предложенный индикатор вероятности нарушения нормативного интервала точнее определяет места замедления поездопотока, чем средняя скорость на блок-участке автоблокировки.

С другой стороны, на рисунке 4 показано, что трехзначная автоблокировка при коэффициенте загрузки пропускной способности исследуемого участка более 0,81 не справляется с обеспечением нормативного интервала 8 минут практически по всей длине участка. Вероятность возникновения волны желтого огня и, как следствие, снижения скорости движения на протяженном участке очень высока, что, в свою очередь, приводит к росту межпоездного интервала, сверхустановленного нормативом, а применение АБТЦ-МШ с АЛС-ЕН решает эту проблему.

Результаты имитационного моделирования применения автоведения пакетов поездов с учетом реальных условий эксплуатации показали, что потенциальный рост пропускной способности ограничен 25 % против теоретической оценки в 35 %, которую дала обобщенная аналитическая модель в первой главе.

В четвертой главе выполнен анализ критериев регулирования при автоведении поездов в режиме квазивиртуальной сцепки с точки зрения их влияния на пропускную способность участков железной дороги и разработаны технические решения электрической централизации для эффективного применения этой технологии.

Рассмотрено три основных варианта: критерий фиксированного расстояния между поездами, критерий межпоездного интервала времени и критерий минимальной безопасной дистанции (по тормозному пути на хвост впередиидущего поезда). Показано, что с точки зрения пропускной способности наиболее эффективен критерий межпоездного интервала, для которого используется заданная разность времени проследования поездами в пакете контрольных точек пути. Данный критерий позволяет использовать энергоэффективное ведение поезда, хорошо сочетается с устоявшейся системой планирования движения поездов, но потребует модернизации программного обеспечения и, возможно, протоколов радиообмена существующих систем «виртуальной сцепки» поездов.

Нарушение некоторых условий приводит к неизбежной динамической замене критерия регулирования, например, неверный выбор межпоездного интервала приводит к необходимости соблюдения минимальной безопасной дистанции при подходе к участку с ограничением скорости и, наоборот, к временному разрыву при выходе с такого участка. Поэтому для алгоритма автоведения важным становится выбор значения межпоездного интервала, который должен учитывать особенности технологии пропуска поездов по участкам и станциям, особенности инфраструктуры, в том числе СИР и временные ограничения скорости, особенности локомотивов и поездов таким образом, чтобы исключить мешающее влияние впередиидущего поезда на движение по заданной кривой скорости.

Оценка минимального межпоездного интервала для автоведения пакета поездов проведена с помощью имитационной модели на основе тяговых расчетов (5) с вычислением средних потерь межпоездного интервала в пакете поездов (6) и диапазоне возможных условий движения на участке с ограничением скорости.

$$\begin{cases} \frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} [u_f f(v) - u_b b(v) - w_o(v) - w_i(s)] \\ u_f = \text{int}(v < V_{\text{пор}}), \text{ при } \forall (u_b(t - \delta) = 0), \delta \in [0, T_3], \\ u_b = \text{int} \left(\forall (v(t + \delta) \geq V_{\text{пор}}(s)) \right), \delta \in [0, T_{\text{пр}}] \end{cases} \quad (5)$$

где v – скорость поезда; s – пройденный путь; t – время; u_f , u_b – управляющие воздействия тяги и торможения; $f(v)$, $b(v)$ – удельная сила тяги и торможения как функции скорости; $w_o(v)$, $w_i(s)$ – удельные силы основного сопротивления как функции скорости и дополнительного сопротивления как функции местоположения (пройденного пути); int – функция преобразования логического значения в целое $int(false) = 0$, $int(true) = 1$; $V_{\text{прог}}$ – программная скорость – допустимая скорость поезда с учетом траектории торможения перед препятствием; δ – временной интервал; $T_{\text{пр}}$ – время прогноза; T_3 – время зарядки тормозов.

$$I_{\text{пи}} = I_{\text{вых}} - I_{\text{вх}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{пи}}$ – потеря межпоездного интервала; $I_{\text{вых}}$, $I_{\text{вх}}$ – межпоездные интервалы на выходе и входе участка, где введено ограничение скорости, при этом длина участка выбирается с учетом запасов на регулирование скорости всех поездов в пакете.

Трехблочное разграничение за счет ограничения скорости движения на желтый сигнал несколько стабилизирует рост потерь межпоездного интервала при движении пакета поездов, но не позволяет использовать резерв сближения поездов до двух блок-участков автоблокировки за счет автоведения в режиме квазивиртуальной сцепки (ВСЦ1). Двухблочное разграничение для ситуации, представленной на срезе OLAP-куба (рисунок 5), позволяет проследовать участок с интервалом меньше 5,5 минут, а если учесть реальную ситуацию с распределением значений и продолжительности ограничений скорости, минимальный интервал 5 минут будет обеспечен в 95 % случаев. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность создания технических решений для систем электрической централизации, которые обеспечат возможность отправления поездов в пакете с интервалом 5–7 минут вместо принятых 8–10 минут в настоящее время.

Поскольку на перегоне возможность движения с интервалом 5 минут обеспечивается при «виртуальной сцепке» с двухблочным разграничением по сигналам трехзначной автоблокировки, то можно предложить использование подвижного блок-участка (рисунок 6) на ограниченном расстоянии – участках удаления со станции.

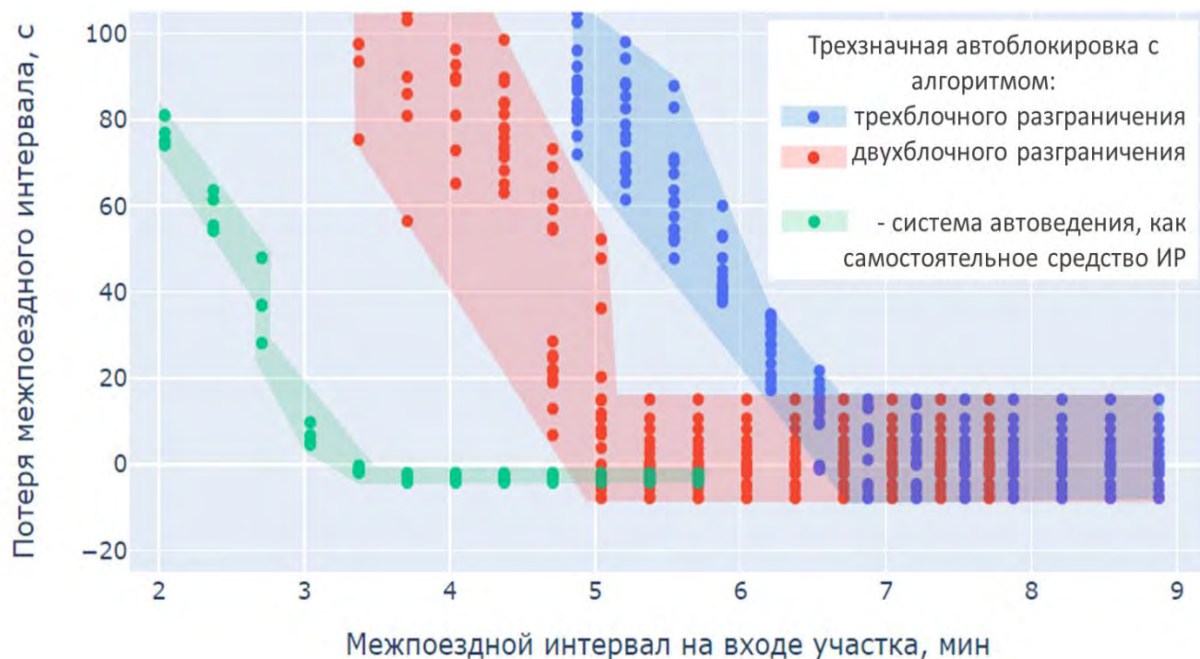


Рисунок 5 – Средние потери межпоездного интервала при проследовании пакетом от 2 до 6 поездов участка с ограничением скорости 50 км/ч и длине РЦ 2500 м

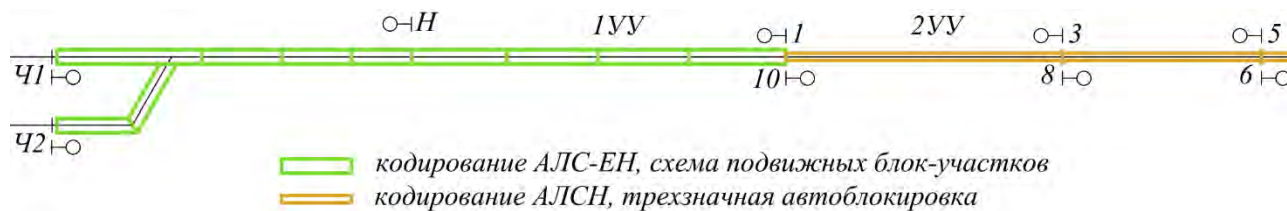


Рисунок 6 – Техническое решение по ограниченной модернизации автоблокировки для сокращения интервала попутного отправления при «виртуальной сцепке»

Например, при наличии подъема на выходе со станции при реконструкции всего 3–3,5 км автоблокировки появляется возможность отправить 60–80 % грузовых поездов с интервалом 5 минут. При этом нужно обеспечить своевременное приготовление маршрутов отправления для поездов в пакете. Для этого предлагаются технические решения для электрической централизации, которые используют специальный режим «Отправление виртуально сцепленных поездов» (ОВСЦ), который предполагает установку новых дополнительных двухзначных светофоров (отмечены красным на рисунке 7) по кривой скорости расчетного поезда при отправлении, используя интервалы времени для движения поездов с двухблочным разграничением.

В нормальном режиме работы ЭЦ дополнительные сигналы выключены с контролем целостности ламп и обозначены как недействующие с помощью светодиодного указателя, не оказывая влияния на работу ЭЦ и АБ при проследовании или отправлении одиночных поездов.

Расстояние между выходным и первым дополнительным светофорами всегда меньше, чем определено правилами расстановки сигналов при трехзначной автоблокировке, поэтому режим ОВСЦ включается с выполнением требований безопасности, исключая движение ведомого поезда без остановки перед выходным сигналом путем проверки занятости не менее 2 путей отправления, специализированных для ВСЦ, и отсутствия установленных маршрутов приема и отправления в требуемом направлении. После перехода станции в режим ОВСЦ исключается установка и накопление новых попутных маршрутов безостановочного пропуска.

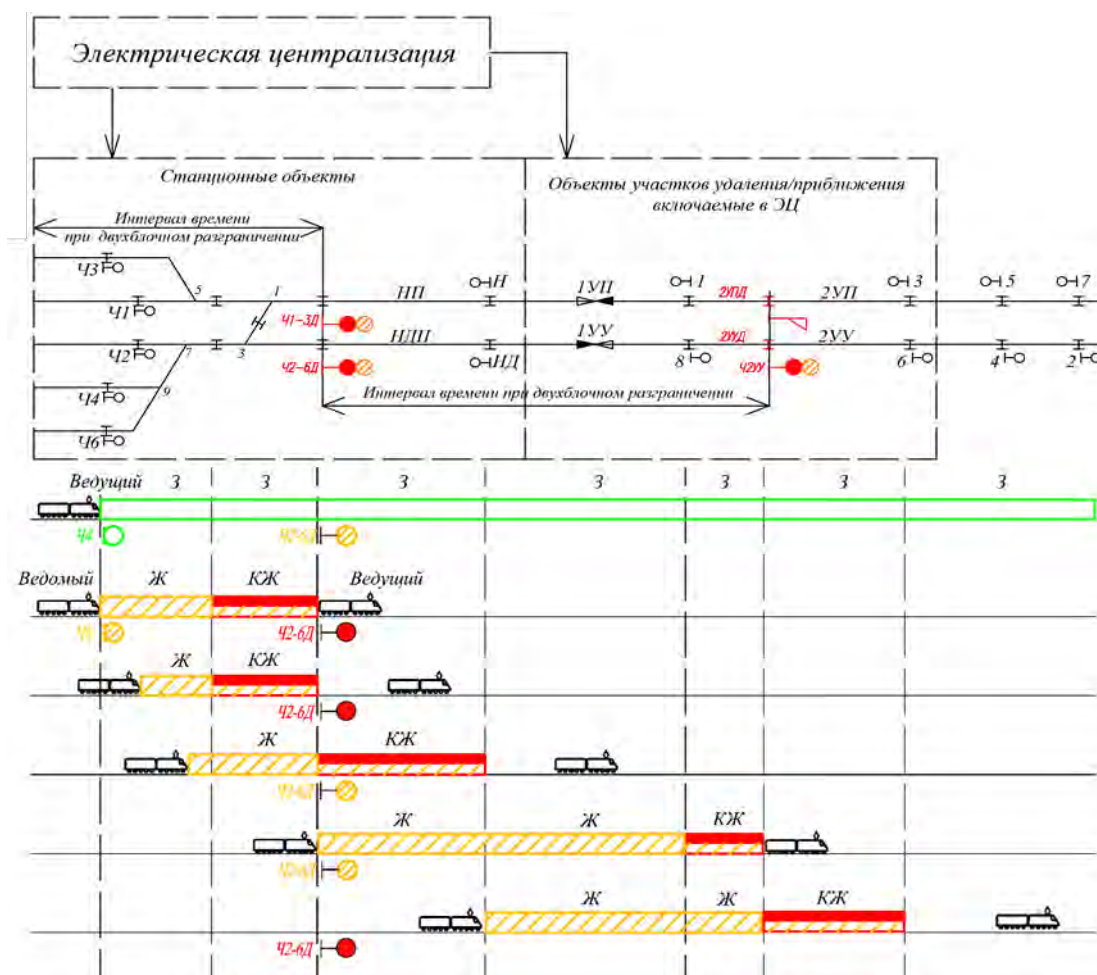


Рисунок 7 – Расстановка дополнительных сигналов для режима ОВСЦ и кодирование секций в маршруте отправления ведомого поезда

В режиме ОВСЦ ЭЦ реализует технологию задания маршрутов отправления с накоплением. Это обеспечивает необходимое сокращение времени установки маршрутов для ведомых поездов с соблюдением условий безопасности. Порядок приготовления маршрутов соответствует последовательности управляющих воздействий дежурного по станции. Маршрут ведущего поезда устанавливается сразу, а маршруты ведомых поездов – по мере размыкания секций предшествующего маршрута, с выдержкой времени для исключения опасного отказа на случай потери шунта под последним вагоном уходящего поезда. Сигнальное показание зависит от числа свободных дополнительных блок-участков, каждый из которых состоит как минимум из двух рельсовых цепей.

Правила кодирования рельсовых цепей в маршруте отправления режима ОВСЦ аналогичны правилам кодирования при подвижном блок-участке с использованием двух показаний КЖ и Ж. Поэтому в режиме разгона ведомый поезд всегда следует на показание Ж, что исключает срабатывание ЭПК (экстренное торможение) при потере кодирования в горловине станции. К концу второго участка удаления расстояние между поездами становится гарантированно больше двух блок-участков трехзначной автоблокировки, и ведомые поезда выходят в установившийся режим следования по правилам кодирования при трехзначной автоблокировке.

В случае если отправление поездов в пакете по одному пути не может обеспечить безопасность применения предложенных технических решений из-за недостаточного расстояния между поездами от момента начала движения ведущего поезда за время требуемого межпоездного интервала, то возможно использование разгонного пути. Длина разгонного пути должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить необходимое разграничивающее расстояние L_p между поездами, отправляющимися с заданным межпоездным интервалом по расчетной кривой скорости, в момент освобождения стрелки разгонного пути (рисунок 8).

Длина разгонного пути должна быть не менее суммы пройденного ведомым поездом пути на момент освобождения ведущим поездом стрелки разгонного пути, длины участка принятия решения, который зависит от расчетной кривой скорости, времени перевода стрелки и установки маршрута с разгонного пути с учетом запасов на восприятие смены сигнального показания, тормозного пути и длины защитного участка.

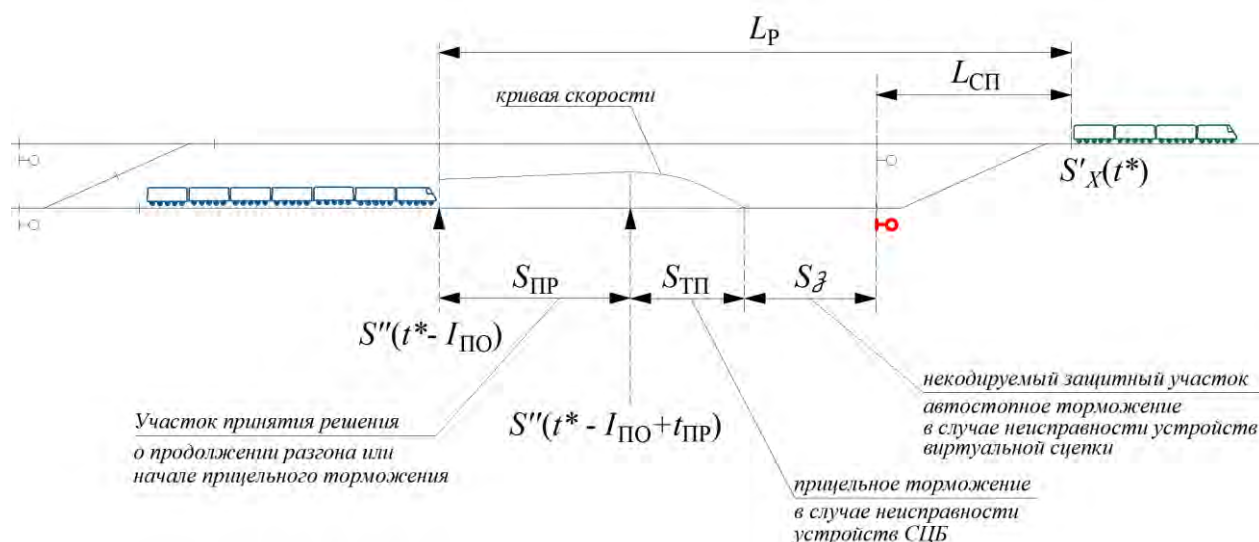


Рисунок 8 – Расстояние между поездами в момент освобождения стрелки разгонного пути

Результаты расчетов разной массы поездов, значений подъема при выходе со станции и разных значений интервала попутного отправления показывают, что на исследуемом участке для поезда унифицированной массы 6300 т с локомотивом 2ЭС6 при подъеме до 4 ‰ и межпоездном интервале 5 минут длина разгонного пути составит примерно 1 км, что является приемлемым решением для сложных условий отправления. Профиль пути, тяговые характеристики локомотива, точность регулирования скорости влияют на выбор длины разгонного пути, поэтому предлагаемый расчет необходимо выполнять для каждого набора условий реального участка.

Аналогично необходимо учитывать минимальный безопасный интервал приема поездов, движущихся в «виртуальной сцепке» с остановкой на боковом пути, что часто сопровождается необходимостью снижения скорости до 40 км/ч.

Область применимости предлагаемых мер приведена на рисунке 9, что показывает возможность движения поездов унифицированной массой в пакете с интервалами 5–5,5 минуты на участках с уклонами до 6 ‰.

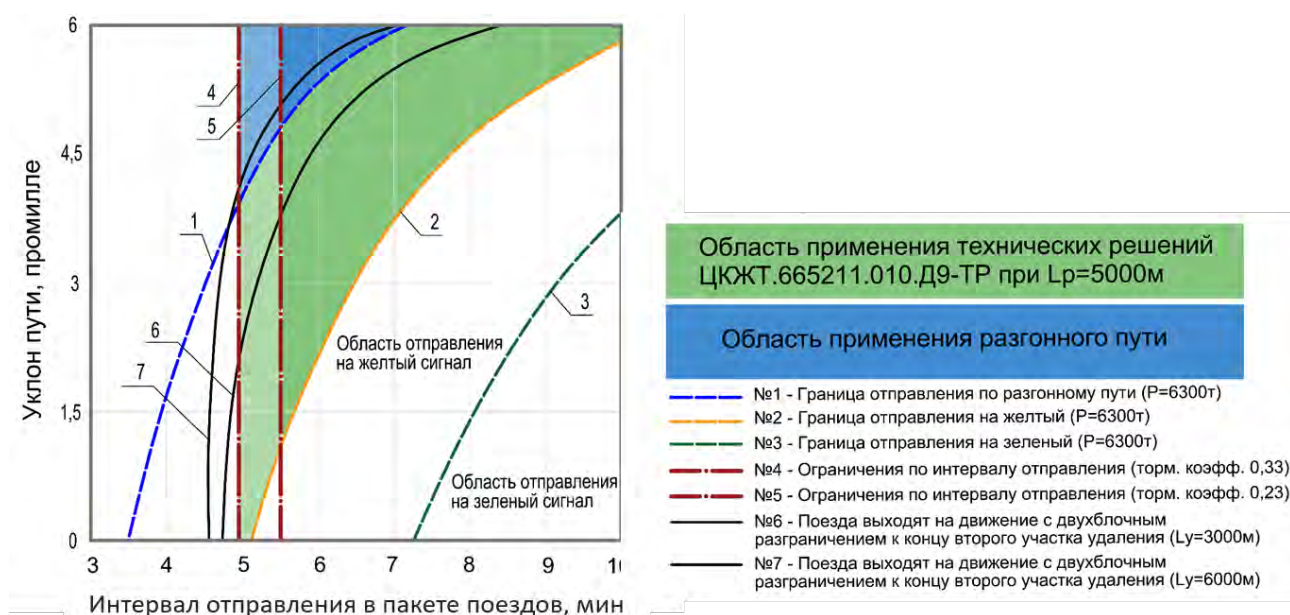


Рисунок 9 – Область применимости разработанных технических решений

В пятой главе выполнена комплексная оценка результатов внедрения квазивиртуальной сцепки ВСЦ1 методом имитационного моделирования с использованием системы ИМЕТРА, а также исследованы процессы естественного пакетообразования грузовых поездов.

Для грузонапряженного железнодорожного направления создана и валидирована модель, на базе которой в дальнейшем проводились эксперименты по внедрению интервального регулирования на основе «виртуальной сцепки» и трехзначной автоблокировки.

Программа экспериментов предусматривала имитацию работы существующей технологии и размеров движения на участке с валидацией показателей потока поездов, интервалов с данными базы ПРУЖД, созданной во втором разделе, а также оценку возможности увеличения пропускной способности при установленных межпоездных интервалах 8 минут и при их сокращении до 5 минут за счет внедрения «виртуальной сцепки». Дополнительно был изучен вопрос восстановления движения поездов на участке после длительного перерыва в движении в результате отказа.

Результаты комплексной оценки показали ограничение эффекта «виртуальной сцепки» до 10 % прироста пропускной способности из-за влияния технологии обработки поездов на станциях участка вместо ожидаемых 25 % роста пропускной способности участка, обоснованных в рамках исследования потенциальных возможностей системы интервального регулирования на реальном участке железной дороги (глава 3). При сохранении размеров движения резерв пропускной способности, создаваемый применением

«виртуальной сцепки», позволяет восстанавливать работу участка после 8-часового перерыва в движении без снижения потока поездов через двое с половиной суток, а временное усиление ПТО ускоряет процесс восстановления более чем в 2 раза.

Следует отметить, что применение «виртуальной сцепки» в нынешних условиях является технологией организации движения, напоминающей технологию соединенных поездов. Возможно, поэтому современная ВСЦ предполагает достаточно длительный процесс ввода поездов в режим с участием машинистов обоих поездов, регламента радиосвязи и т. п. После установления соединения ВСЦ поезда движутся в состоянии виртуального сцепления тысячи километров. Введено специальное обозначение для ГИД, к номеру поезда приписывают литеры: «ВСЦ1» – для ведущего поезда, «ВСЦ2» – для ведомого поезда. У ведущего поезда ограничивают тягу на уровне 90 %, чтобы снизить вероятность разрыва ВСЦ вследствие чрезмерного увеличения дистанции между поездами; внедрена система стимулирования диспетчерского аппарата за применение виртуальной сцепки, которая требует дополнительных усилий при организации движения. Учет и минимизация всех мешающих ВСЦ поездам факторов неизбежно ведет к управленческим решениям, замедляющим продвижение прочих поездов в потоке, к росту расходов на перевозки и, в конечном итоге, к снижению экономического эффекта от внедрения технологии «виртуальной сцепки».

Исследование процесса естественного группообразования поездов на данных ГИД-Урал показало, что пакеты в реальном потоке поездов, отобранные с приоритетом на стабильность (рисунок 10), преимущественно состоят из 2 поездов и в 70 % случаев «разваливаются» или переформируются после проследования 4 промежуточных станций. Пакеты поездов, отобранные с приоритетом на максимальный размер (рисунок 11), выгоднее с точки зрения эффекта увеличения пропускной способности за счет возможности сокращения межпоездного интервала между поездами в пакете, но в 50 % случаев «разваливаются» после первой же станции. Поэтому предлагается новый подход – «Автоведение пакетов виртуально сцепленных поездов как элемент системы интервального регулирования». Необходимо разрабатывать технические решения автоведения пакетов поездов, опирающиеся на естественное (динамическое) группообразование поездов с приоритетом на максимальное количество виртуально сцепленных поездов в пакете.

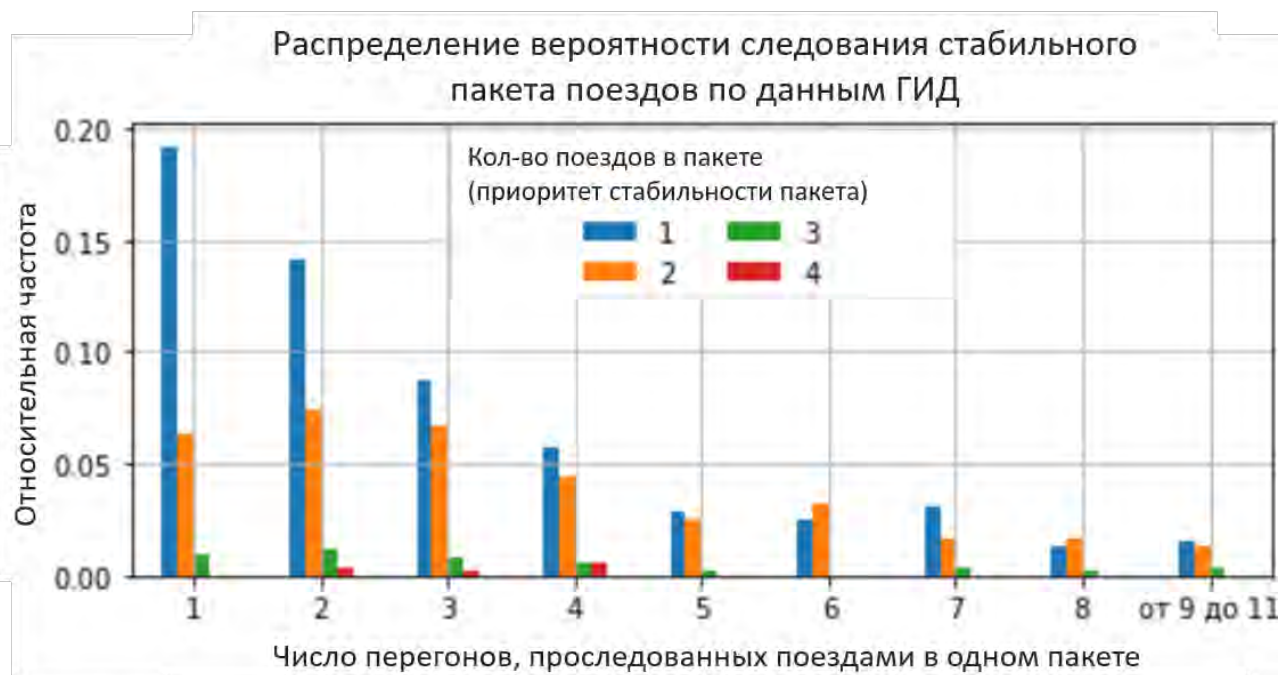


Рисунок 10 – Распределение вероятности следования пакета поездов, сформированной с приоритетом на стабильность (по данным ГИД)



Рисунок 11 – Распределение вероятности следования пакета поездов, сформированной с приоритетом на размер группы (по данным ГИД)

Однако в настоящее время число поездов в «виртуальной сцепке» ограничено двумя. Ведутся эксперименты по объединению в пакет до 5 виртуально сцепленных поездов. При этом выше показано, что естественным образом в пакете может оказаться и большее количество поездов.

В результате исследования вопроса влияния технических ограничений по количеству поездов в пакете виртуально сцепленных поездов получены зависимости доли поездов потока в пакетах с заданным числом поездов и прирост пропускной способности (рисунок 12), откуда наглядно видно, что при увеличении с 2 до 5 поездов в пакете прирост пропускной способности увеличивается с 10 % до 16 %, при этом основной выигрыш достигается уже при 3 поездах в пакете.

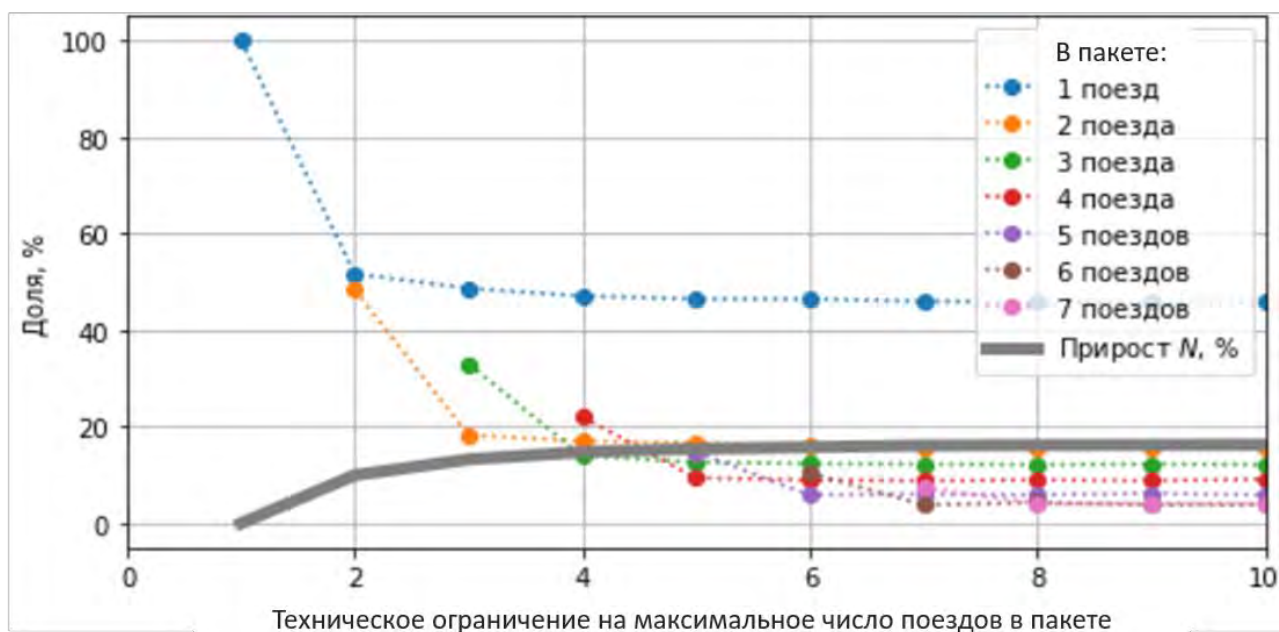


Рисунок 12 – Доля пакетов поездов и прирост пропускной способности в зависимости от технических ограничений системы автоведения на количество поездов в виртуальной сцепке

Распределение межпоездных интервалов в графике движения поездов, смоделированном для динамического пакетобразования поездов с 5-минутным межпоездным интервалом (рисунок 13), показывает, что лишь 20 % поездов могут использовать такой интервал при движении в пакете, остальные 80 % задерживаются выполнением технологических операций на станциях.

Поэтому для получения максимально возможного (потенциального) эффекта в 25–30 % от автоведения пакетов поездов как элемента системы интервального регулирования необходимо совершенствовать технологию работы станций. Реально достижимый результат в виде прироста пропускной способности в краткосрочном периоде только за счет организации движения поездов по технологии виртуальной сцепки не сможет превысить 10 %.

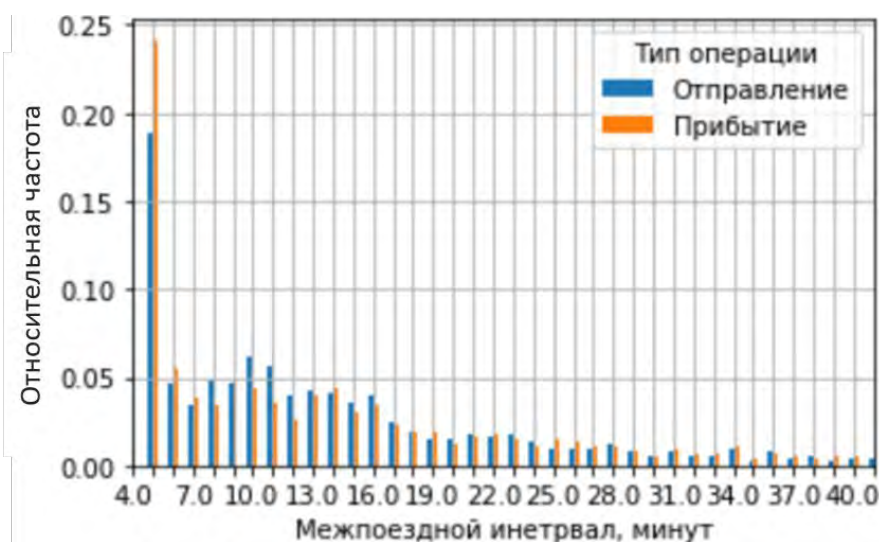


Рисунок 13 – Распределение межпоездных интервалов на модельном графике движения поездов при минимальном межпоездном интервале 5 минут

Расчет экономического эффекта внедрения автоведения пакетов поездов показал, что срок окупаемости при сохранении размеров движения не превышает 3–4 лет, а экономический эффект на горизонте планирования 10 лет увеличивается с ростом объема перевозок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований по теме диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Из анализа потенциальных эффектов и исследований разных направлений повышения провозной способности участка железной дороги установлено, что существуют значительные резервы, обусловленные возможностью увеличения пропускной способности за счет повышения скорости движения грузовых поездов и сокращения межпоездных интервалов, которые могут быть задействованы путем развития технологии виртуальной сцепки поездов.

2. Уточнено понятие виртуальной сцепки поездов и этапы приближения технических систем к реализации этой технологии. Такая классификация виртуальной сцепки поездов позволяет конкретизировать требования к системам автоведения, инфраструктуре СЖАТ и радиосвязи в зависимости от степени сближения поездов и уровня автоматизации процесса управления.

3. Разработана методология исследования пропускной и провозной способности участков и направлений железных дорог, отличающаяся детализацией данных о движении потока поездов, полученных из ряда АСУ

РЖД (ГИД-Урал, АСУТ-НБД2 и др.), и расширением этих данных за счет расчетных и имитационных моделей. Создана и зарегистрирована база данных поездной работы участка железной дороги, образующая основу OLAP-кубов, предназначенных для изучения методами машинного обучения вопросов организации движения, использования тяги поездов, работы систем интервального регулирования и энергоснабжения.

4. Разработана имитационная модель интервального регулирования на направлении железной дороги, которая позволяет оценить достигнутые межпоездные интервалы, а также возможность их сокращения путем применения новых систем интервального регулирования на том же участке, выявить узкие места в пропускной способности участков железных дорог, возникающие под действием эксплуатационных факторов (особенностей инфраструктурных проектных решений, текущего состояния пути, организации движения, характера ведения поездов).

5. Рассмотрены три базовых критерия регулирования системы автоведения грузовых поездов с реализацией технологии квазивиртуальной сцепки: дистанция, временной интервал, тормозной путь. В результате анализа влияния выбранного критерия на пропускную способность в условиях ограничений скорости и взаимодействия с СИР на перегонах и станциях установлено, что использование дистанции между ведущим и ведомыми поездами в качестве критерия регулирования скорости при движении пакета поездов неэффективно с точки зрения пропускной способности участка железной дороги. Рекомендуется переход к критерию постоянного временного интервала между виртуально сцепленными поездами, который обеспечивает лучшие условия для сокращения межпоездного интервала на участках, оборудованных автоблокировкой, и использования энергоэффективного ведения поездов. При этом возможно организовать движение поездов в режиме квазивиртуальной сцепки с интервалом 5–5,5 минуты с остановками практически на любой станции исследуемого участка.

6. Разработаны технические решения станционных СЖАТ (правила расстановки дополнительных выходных светофоров, алгоритмы их работы и кодирования участков пути) для обеспечения отправления поездов в виртуальной сцепке с заданным межпоездным интервалом, которые позволяют сократить интервал попутного отправления при «виртуальной сцепке» до 5–5,5 минуты для 70–80 % грузовых поездов без строительства разгонного пути.

7. Комплексная оценка пропускной способности одного из направлений железной дороги при массовом внедрении «виртуальной сцепки» для унифицированных по массе или длине грузовых поездов показала прирост

пропускной способности на 10 %, при этом лимитирующим фактором становится технология работы ПТО. В случае критического для существующей технологии перерыва в движении (до 8 часов в одном направлении) «виртуальная сцепка» позволяет через 2–2,5 суток восстановить нормальную работу участка с сохранением общего грузопотока, а временное увеличение производительности ПТО позволяет увеличить пропускную способность и сократить время восстановления нормальной работы участка до одних суток.

8. Взамен развивающегося подхода «Организация движения виртуально сцепленных поездов» предложено направление доработки систем автоведения с целью динамического формирования и расформирования пакета виртуально сцепленных поездов, обеспечивающее снижение межпоездного интервала без модернизации СИР, при котором функция обеспечения безопасности при критическом сближении поездов сохраняется за существующими системами интервального регулирования, а система автоведения динамически объединяет грузовые поезда квазивиртуальной сцепкой и оптимизирует движение ведомого или ведомых поездов, обеспечивая сокращение межпоездных интервалов.

9. Сформулированы обоснованные и технически достижимые требования к новому поколению систем автоведения пакетов поездов на основе естественного образования пакетов поездов, обеспечивающие снижение отрицательного влияния на пропуск других категорий поездов в потоке на железнодорожном направлении. Показано, что увеличение числа поездов в пакете «виртуальной сцепки» с сегодняшних двух до 3–5 поездов увеличивает эффект в 1,5 раза, а дальнейшее увеличение требует совершенствования инфраструктуры и технологии работы станций.

10. Расчет экономической эффективности массового внедрения «виртуальной сцепки» грузовых поездов с учетом выполнения предложенных технических решений (при условии достаточности энергообеспечения участка) показал, что за счет увеличения объема перевозок срок окупаемости составит 3 года. В случае сохранения размеров движения образуется дополнительный доход за счет роста участковой скорости на фоне снижения коэффициента использования пропускной способности.

11. Перспективы дальнейших исследований – совершенствование имитационной модели в части расширения критериев регулирования скорости и энергоэффективности при автоведении в режиме виртуальной сцепки; разработка методов применения централизованного автоведения для решения задачи повышения пропускной способности; применение созданной базы данных поездной работы участка железной дороги к решению задач

энергоснабжения; интеграция имитационной модели движения пакета поездов с моделями работы полигона, например с системой ИМЕТРА.

Предложенные методы и алгоритмы обработки информации АСУ РЖД в перспективе целесообразно интегрировать в системы управления ЭЛЬБРУС-М, ИСУЖТ, ГИД для поддержки принятия решений об использовании и развитии пропускных способностей участков железных дорог. Созданная база данных ПРУЖД должна быть использована в исследованиях движения потока поездов методами машинного обучения и с помощью искусственного интеллекта для решения задач в области организации движения, интервального регулирования, использования тяги поездов, влияния ограничений скорости и энергоснабжения.

ПУБЛИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения диссертации опубликованы в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации и приравненных к ним:

1. Бушуев, С. В. Оценка перспективы сокращения межпоездных интервалов за счет применения новых технологий интервального регулирования / С. В. Бушуев, Н. Г. Шабалин, А. С. Мишарин // Транспорт Российской Федерации. – 2024. – № 2 (111). – С. 11–17.

2. Бушуев, С. В. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов / С. В. Бушуев, И. А. Ковалев // Автоматика на транспорте. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 64–73.

3. Бушуев, С. В. Анализ способов повышения пропускной способности железных дорог / С. В. Бушуев, Н. С. Голочалов // Транспорт Урала. – 2023. – № 1 (76). – С. 42–50.

4. Оценка погрешностей определения скорости и ускорения средствами спутниковой навигации / О. Б. Имарова, А. В. Димов, С. В. Бушуев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 2. – С. 26–29.

5. Бушуев, С. В. Технические решения повышения пропускной способности станции при использовании технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, Н. С. Голочалов // Транспорт Урала. – 2023. – № 3 (78). – С. 46–55.

6. Технические решения по централизации управления железнодорожным транспортом в подземных горных выработках / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Д. В. Копытов // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 4. – С. 21–26.

7. Бушуев, С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог / С. В. Бушуев // Автоматика на транспорте. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 343–353.
8. Пути развития подвижного состава в рамках цифровизации железнодорожного транспорта / А. Н. Антропов, Т. А. Антропова, С. В. Бушуев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. – № 4 (88). – С. 200–208.
9. Бушуев, С. В. Автоматическое управление закрытием переезда по характеристикам приближающегося поезда / С. В. Бушуев, А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев // Транспорт Урала. – 2021. – № 1 (68). – С. 3–7.
10. Попова, М. Л. Оценка вероятностей возникновения изломов и их выявления рельсовыми цепями / М. Л. Попова, А. Н. Попов, С. В. Бушуев // Транспорт Урала. – 2021. – № 3 (70). – С. 8–14.
11. Бушуев, С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 1–20.
12. Анализ загрузки путевого развития станции (по данным архивов систем централизаций стрелок и сигналов) / С. В. Бушуев, Б. В. Рожкин, А. А. Блюдов, Н. С. Голочалов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(50). – С. 30–44.
13. Бушуев, С. В. Средства контроля свободности участков пути и изломы рельсов / С. В. Бушуев, А. Н. Попов, М. Л. Попова // Транспорт Урала. – 2020. – № 3 (66). – С. 43–50.
14. Попова, М. Л. Анализ влияния эксплуатационных параметров на образование дефектов и изломов с целью внедрения альтернативных систем контроля свободности участков пути / М. Л. Попова, С. В. Бушуев, А. Н. Попов // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 6 (84). – С. 34–46.
15. Бушуев, С. В. Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути / С. В. Бушуев, А. Н. Попов, М. Л. Попова // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5, № 2. – С. 202–220.
16. Бушуев, С. В. Автоматизация калибровки и поверки средств измерения в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики / С. В. Бушуев, А. Н. Попов // Транспорт Урала. – 2017. – № 1. – С. 52–56.
17. Бушуев, С. В. Возможности и применение системы технического диагностирования и удаленного мониторинга на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров СТД-МПК / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Б. В. Рожкин // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 513–529.

18. Бушуев, С. В. Подходы к определению ущерба для перевозочного процесса в метрополитенах при отказах устройств железнодорожной автоматики / С. В. Бушуев, А. Н. Попов, С. В. Стюков // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, – № 3. – С. 413–424.

19. Бушуев, С. В. Развитие подходов к анализу данных, получаемых с систем диагностики железнодорожной автоматики и телемеханики / С. В. Бушуев, А. Н. Попов, К. В. Гундырев // Транспорт Урала. – 2016. – № 3(50). – С. 32–35.

20. Бушуев, С. В. Исследование влияния средств технического диагностирования на надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики / С. В. Бушуев, А. Н. Попов, М. Л. Ускова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (59). – С. 28–33.

21. Бушуев, С. В. Оценка влияния систем технической диагностики и мониторинга на надежность работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации / С. В. Бушуев, М. Л. Ускова, А. Н. Попов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3. – С. 68–72.

22. Средства технической диагностики и удаленного мониторинга СТД-МПК / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, К. В. Гундырев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 10. – С. 6–8.

23. Никитин, А. Б. Модель принятия решений в интеллектуальной системе управления движением поездов на станции / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, Р. В. Кучумов // Транспорт Урала. – 2009. – № 2 (21). – С. 22–25.

24. Никитин, А. Б. Тенденции развития электрической сигнализации и компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев // Транспорт Урала. – 2006. – № 2 (9). – С. 14–18.

25. Проектирование пользовательского интерфейса для ЭЦ-МПК / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, Р. Ш. Валиев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2006. – № 10. – С. 10–11.

26. Структура и технические средства ЭЦ-МПК / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, Р. Ш. Валиев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2006. – № 8. – С. 2–5.

Публикации, проиндексированные в Scopus:

27. Bushuev, S. V. Improving the efficiency of transport systems using simulation (Повышение эффективности транспортных систем с помощью моделирования) / S. V. Bushuev [и др.] // Xitong Fangzhen Xuebao. – 2020. – Т. 32, N 2. – P. 340–345.

28. Bushuev, S. Reducing train intervals with virtual coupling technology (Уменьшение межпоездного интервала за счет технологии виртуальной сцепки) / S. Bushuev, N. Golochalov // International Scientific and Practical Conference "Railway Transport and Technologies" (RTT-2021) : Collection of conference materials. Volume 2624, Ekaterinburg, 24–25 ноября 2021 года. – USA: AIP PUBLISHING, 2023. 020011. –7 p.

29. Bushuev, S. V. Investigation of a direct current traction power supply system when trains are running in a virtual coupling (Исследование системы тягового электроснабжения постоянного тока при движении поездов в виртуальной сцепке) / S. V. Bushuev, I. Baeva // Collection of conference materials. – Ekaterinburg : USA: AIP PUBLISHING, 2021. – Т. 2624. – Р. 30–57.

30. Distributed fiber-optic sensors for location monitoring of rolling stock (Распределенные волоконно-оптические датчики для контроля местоположения подвижного состава) / A.N. Popov, S.V. Bushuev, R.Z. Galinurov, A.B. Nikitin // AIP Conference Proceedings, Perm, 01–03 мая 2021 года. – Perm, 2021.

Патенты и свидетельство о регистрации базы данных:

31. Пат. RU 2809289 C1 USA. Способ попутного отправления поездов при использовании радиоканала / С. В. Бушуев, Н. С. Голочалов. – Опубл. 11.12.2023.

32. Свидетельство о гос. регистрации базы данных. Поездная работа участка железной дороги (ПРУЖД) / С. В. Бушуев, А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк, Д. С. Плотников. – № 2023623680 ; заявл. от 31.10.2023 ; опубл. 20.11.2023.

33. Пат. RU 2384886 C2. Способ и устройство удаленного мониторинга и технической диагностики железнодорожных устройств автоматики и телемеханики / С. В. Бушуев, К. В. Гундарев. – № 2008118803/11 ; заявл. 12.05.2008 ; опубл. 20.03.2010.

Монография:

34. Бушуев, С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация : монография / А. В. Бушуев, В. И. Бушуев, С. В. Бушуев. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2014. – 311 с.

Подписано в печать 25.12.2024. Формат 60 х 84 1/16.

Усл. печ. л. 1,86. Тираж 100 экз. Заказ 41.

УрГУПС, 620034, Екатеринбург, Колмогорова, 66
