

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
ФГБОУ ВО УрГУПС

На правах рукописи



Голочалов Николай Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ
АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

2.9.4 Управление процессами перевозок (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Бушуев Сергей Валентинович
кандидат технических наук, доцент

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	10
1.1 Способы повышения пропускной способности.....	10
1.2 Применение технологий соединенного поезда и виртуальной сцепки поездов	17
1.3 Сокращение межпоездных интервалов.....	20
Цель и задачи исследования.....	28
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ.....	29
2.1 Способы моделирования движения поезда	29
2.2 Моделирование движения поезда по значениям ускорений	31
2.3 Анализ данных реальных поездок.....	34
2.4 Регрессионная модель ускорения поездов	44
2.5 Методика моделирования движения поездов	49
2.6 Верификация регрессионной модели ускорения поезда.....	50
Выводы по 2 главе.....	53
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ...	54
3.1 Моделирование отправления поездов в виртуальной сцепке	54
3.2 Определение длины разгонного пути	76
3.3 Моделирование попутного приема поездов в виртуальной сцепке.....	85
Выводы по 3 главе.....	99
4 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКИ.....	101
4.1 Постановка задачи разработки технических и технологических решений	101
4.2 Технология отправления поездов в виртуальной сцепке.....	104
4.3 Технические решения по отправлению поездов в виртуальной сцепке	106

4.4 Повышение пропускной способности при использовании технологии виртуальной сцепки	123
Выводы по 4 главе.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ В	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Железнодорожные перевозки всегда занимали особое место в экономике России. В настоящее время происходит перенаправление грузопотоков в сторону Юга и Востока, отмечаются тенденции роста и пассажирских перевозок. Правительством РФ поставлены задачи по развитию пропускных способностей коридора Север-Юг. Также. В соответствии со стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» одним из основных направлений является разработка и внедрение перспективных технических средств хозяйства автоматики и телемеханики, которые должны обеспечить потребную пропускную способность.

Развитие локомотивных систем безопасности движения привело к тому, что уже сейчас возможно движение грузовых поездов на желтый сигнал проходного светофора большинства участков со скоростью более 60 км/ч за счет применения технологии виртуальной сцепки, при которой расчет кривой допустимой скорости осуществляется с учетом информации о движении впередиидущего поезда, передаваемой между локомотивами по радиоканалу. Благодаря этому, между поездами на перегонах возможно уменьшение разграничивающего интервала без снижения скорости. Тогда на участках с интенсивным движением можно получить фактический межпоездной интервал меньше запроектированного для трехзначной автоблокировки, если обеспечить соответствующее уменьшение интервала попутного отправления.

Существующие алгоритмы станционной автоматики позволяют выполнять попутное отправление поездов при освобождении хвостом уходящего поезда хотя бы одного участка удаления. На некоторых станциях возможно уменьшение интервала попутного отправления за счет применения известных технических решений по установке первого проходного светофора в створе со входным, либо за счет применения дифференцированных участков удаления, длина которых будет зависеть от того, с какого пути отправляется поезд. Применение существующих способов не

может в полной мере обеспечить необходимых интервалов между поездами в виртуальной сцепке. Поэтому возникает необходимость исследования возможностей существующих станционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики и разработке технико-технологических решений по реализации интервалов попутного отправления и прибытия, меньших, чем было заложено при проектировании участка.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие перегонных и станционных систем автоматики и телемеханики внесли ученые: Бестемьянов П.Ф. [1–3], Брылеев А.М. [4], Бушуев С.В. [5–10], Воронин В.А. [11–14], Гавзов Д.В. [15–18], Кокурин И.М. [19–23], Линьков В.И. [24–28], Ляной В.В. [29–31], Никитин А.Б. [5; 9; 10; 19; 32], Переборов А.С. [4], Розенберг Е.Н. [33–39], Сапожников В.В. [4; 17–19], Сапожников Вл.В. [4; 18], Шаманов В.И. [40–42], Шалягин Д.В. [43–45] и другие.

Большой вклад в изучение вопросов пропускной способности и технологии работы станций сделали ученые: Александров А.Э. [46–48], Бородин А.Ф. [49–51], Бессоненко С.А. [52–54], Козлов П.А. [46; 51; 55–57], Климова Е.В. [53; 58–60], Левин Д.Ю. [56; 57; 61–65], Тимухина Е.Н. [66–69], Тушин Н.А. [70–72], и другие.

Развитием локомотивных систем безопасности движения занимались ученые: Абрамов В.М. [35; 43; 73; 74], Баранов Л.А. [75–79], Головин В.И. [80–83], Ерофеев Е.В. [84; 85], Кравцов Ю.А. [86–88], Никифоров Б.Д. [43; 88], Наговицын В.С. [89–91] и другие.

Исследованием вопросов интервального регулирования движения поездов с применением радиоканала занимались зарубежные ученые: F. Flammini [92; 93], S. Marrone [92; 93], T. Dick [94–98], Shaofeng Lu [99–101], Jing Xun [102], Yafei Liu [95; 103–106] и другие.

Область исследований соответствует паспорту специальности 2.9.4 Управление процессами перевозок, а именно пункту 6 «Системы и устройства автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, их эксплуатация, методы построения и испытания».

Объектом исследования является интервальное регулирования движения поездов с использованием технологии виртуальной сцепки.

Предметом исследования являются алгоритмы управления устройствами автоматики и телемеханики.

Цель исследования – совершенствование систем железнодорожной автоматики и телемеханики для повышения пропускной способности участков железных дорог при использовании технологии виртуальной сцепки.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать способы повышения пропускной способности участков железных дорог.

2. Разработать методику моделирования движения поездов на основе данных о фактическом движении поездов.

3. Определить требования к станционным системам автоматики и телемеханики на основании моделирования попутного отправления и прибытия поездов в виртуальной сцепке.

4. Разработать технические решения, позволяющие выполнять попутное отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом времени меньшим, чем расчетный, при трехблочном разграничении движения поездов.

Научная новизна. В результате исследований впервые разработаны и представлены:

1. Методика моделирования движения поездов на основе спрогнозированных с помощью регрессионной модели значений ускорений, полученных в зависимости от скорости поезда, массы поезда, процента используемой силы тяги и уклона пути.

2. Метод определения длины разгонного пути в зависимости от интервала попутного отправления поездов, времени подготовки маршрута, процента используемой силы тяги и массы поездов.

3. Технические решения совершенствования железнодорожных систем автоматики, позволяющие выполнять безопасное попутное отправление грузовых поездов, использующих технологию виртуальной сцепки, с интервалом времени, соответствующим интервалу при двухблочном разграничении движения поездов.

Теоретическая значимость заключается в исследовании взаимосвязи массы поездов, скорости, процента используемой силы тяги и уклона пути с интервалами попутного отправления и прибытия.

1. Построена регрессионная модель линейного типа, позволяющая прогнозировать ускорение поезда в зависимости массы поезда, скорости, процента используемой силы тяги и уклона пути. С использованием регрессионной модели проведено моделирование движения поездов при попутном отправлении и прибытии:

– определены интервалы попутного отправления, при которых потребуется строительство разгонного пути;

– определены интервалы попутного отправления, при которых обеспечивается движение поездов с двухблочным разграничением к концу второго участка удаления;

– определены интервалы попутного прибытия, в зависимости от тормозного коэффициента, при которых не возникает задержек приема поездов.

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

Практическая значимость. На основании результатов исследования разработаны технические решения для микропроцессорной централизации МПК-МПК (ЦКЖТ.665211.010.Д9-ТР), позволяющие выполнять отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом попутного отправления, соответствующим интервалу двухблочного разграничения движения поездов. Результаты исследования использовались в научно-исследовательской работе «Управление потоком поездов на основе интеллектуализации локомотива и цифровой радиосвязи» (рег. № АААА-А20-120042190034-0).

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы формализации и математического представления, метод численного моделирования, методы регрессионного анализа, сети Петри.

Положения, выносимые на защиту:

1. Регрессионная модель, позволяющая прогнозировать значения ускорения поезда в зависимости от массы поезда, скорости, процента используемой силы тяги и уклона пути.

2. Метод определения длины разгонного пути, позволяющий получить численные оценки необходимого строительства нового пути, в зависимости от интервала попутного отправления, уклона пути, процента используемой силы тяги и массы отправляющихся поездов.

3. Алгоритмы работы устройств автоматики и телемеханики, позволяющие выполнять попутное отправление поездов в виртуальной сцепке, для реализации движения поездов с двухблочным разграничением.

Степень достоверности результатов подтверждается логичным построением процесса исследования, корректным использованием математических методов, проведенной верификацией на основе сравнения кривых скоростей движения поезда, полученных по результатам моделирования, с фактически реализованными кривыми и построенными по результатам тягового расчета, а также использованием при моделировании информации о длинах реальных блок-участков, полученной из электронных карт локомотивных систем безопасности движения.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на конференциях:

– «Транспортные интеллектуальные системы – 2019». II Научно-методическая конференция. 26-27 сентября 2019 г., г. Санкт-Петербург;

– «Транспорт Урала – 2019». Всероссийская научно-техническая конференция. 5 декабря 2019 г., г. Екатеринбург;

– «Интеллектуальные технологии на транспорте и в гражданском строительстве». Научно-практическая конференция. 15 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург;

– «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы». LXXXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 19-26 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург;

– «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transport and technologies, RТТ-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;

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

– «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы». LXXXIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 17-24 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург.

Публикации. По теме исследования опубликовано семь печатных работ, в том числе четыре в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 182 страницах, содержит 126 страниц основного текста, 56 рисунков, 9 таблиц и 3 приложения на 22 страницах. Список литературы включает 193 наименования.

1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

1.1 Способы повышения пропускной способности

Из накопленных знаний о железнодорожном транспорте известна связь между пропускной и провозной способностями [61; 107]. Одним из первых решений по использованию резервов для повышения провозных способностей стало увеличение длины и как следствие массы поездов, для исключения неполносоставных и неполновесных поездов в графике, так как у локомотивов была недоиспользованная мощность (двигатели локомотивов развивались с опережающим темпом). При этом было выявлено, что повышение длины поезда до определенного значения, приводит к снижению числа пропускаемых поездов. Технологические операции с такими поездами производились с занятием горловины, что приводит к увеличению станционных интервалов.

Выделяют две основные группы способов повышения пропускной способности: организационно-технические, характерные тем, что их реализация не требует значительных капиталовложений, и реконструктивные, связанные со значительными инвестициями в переустройство инфраструктуры железных дорог [108].

Для наглядного представления возможных способов повышения пропускной способности можно использовать метод изображения причинно-следственных связей – «диаграмма Исикавы» (рисунок 1.1).

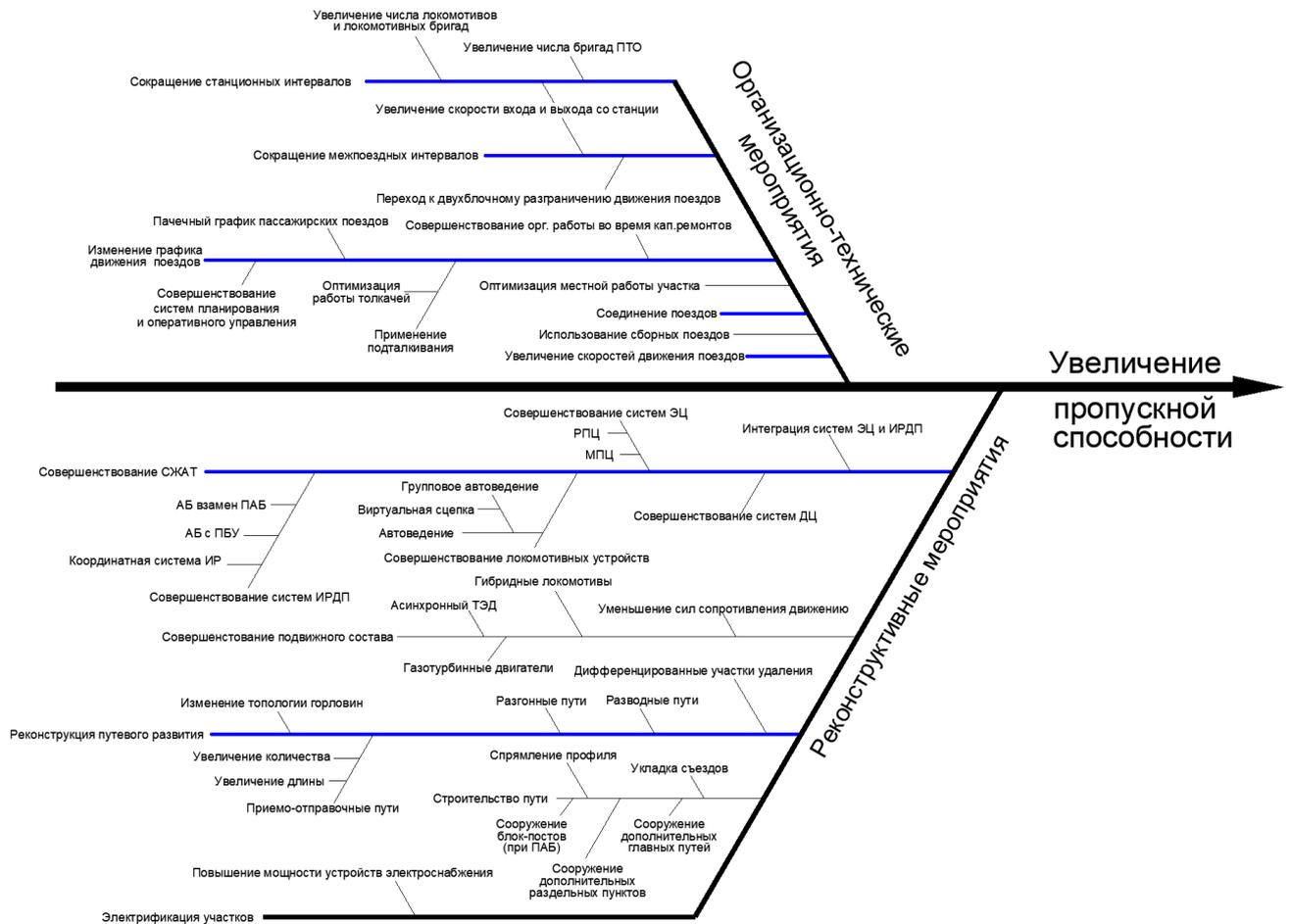


Рисунок 1.1 – Способы увеличения пропускной способности [109]

Исследуемая проблема обозначается основной стрелкой, а влияющие на нее факторы являются примыканиями разного уровня. В данном случае на рисунке 1.1 представлена диаграмма способов повышения пропускной способности участка железных дорог, полученная на основе анализа научных источников на тему повышения пропускной способности железных дорог, а также доработанная с учетом мнения экспертов. Синим цветом обозначены те ветви диаграммы, которые рассмотрены в данном исследовании.

Несмотря на то, что теоретически можно разделить все способы повышения пропускной способности на две основные группы, на практике повышение пропускной способности становится задачей требующей комплексного подхода к решению из-за тесной взаимосвязи элементов железнодорожной сети [61].

Так в работе [49], повысить обоснованность комплексных проектов развития, а также порядок мероприятий в них, предлагают с помощью метода оценки перевозочной мощности – баланса растущих объемов перевозок, высоких темпов развития инфраструктуры и ремонтных работ.

Исследования, направленные на оценку эффекта повышения пропускной способности от применения комплексных мероприятий, зачастую проводятся с помощью моделирования для конкретного участка, например в [110], оцениваются мероприятия по развитию участка Восточно-Сибирской железной дороги, а в [50; 111] – участков Дальневосточной железной дороги.

Интерес представляют также и работы изучающие отдельные аспекты процесса повышения пропускной способности. Например, в работе [34], ученые НИИАС рассматривают повышение пропускной способности при совершенствовании систем интервально регулирования движения поездов, при этом обозначаются необходимые дополнительные меры, совместная реализация которых приведет к повышению пропускной способности.

1.1.1 Повышение скоростей движения поездов

В монографии [61] Д.Ю. Левин представляет результаты анализа скоростемерных лент локомотивов (состояние на 2009-2010 гг), в части выполнения заложенной в график скорости:

– при следовании на код «З», фактическая ходовая скорость ниже расчетной на 20%, а графиковой на 8%;

– при следовании на код «Ж», фактическая ходовая скорость ниже расчетной на 46% а графиковой на 38%;

– при следовании на код «КЖ», фактическая ходовая скорость ниже расчетной на 63%;

– при сквозном пропуске по станции, фактическая скорость в среднем меньше на 5-6 км/ч, чем при движении по перегону.

Это объясняется прежде всего разной квалификацией машинистов, неодинаково реагирующих на показания светофоров. Отмечается, что невыполнение скоростного режима при движении «под зеленый, на зеленый» снизило пропускную способность на 8%.

В работе [112] приводится анализ выполнения показателя участковой скорости на Северо-Кавказской ж.д., среди причин потерь скорости указываются следующие:

- наличие большого количества цистерн и порожних вагонов, которые уменьшают устойчивость поезда, тем самым ограничивая максимальные скорости движения;
- значительное влияние пассажирского движения на грузовое, особенно из-за изменения в летний период;
- неравномерный подход поездов, является причиной простоя составов в ожидании локомотива;
- квалификация и загрузка персонала.

Существуют резервы повышения скоростей, поэтому необходимо исследование возможностей их использования [113; 114]. Добиться повышения скоростей можно за счет полного использования мощности локомотива, однако не стоит считать недоиспользование мощности как ошибку, повышать массу и длину поезда следует после выполнения оптимизационных расчетов, иначе возможен износ инфраструктуры и ухудшение безопасности движения [61]. Мощность современных локомотивов можно расходовать как на повышение массы, так и на повышение скорости движения, в работе [115] производится сравнение эффекта от повышения массы или увеличения скорости для одного типа локомотива, повышение скорости дает прибавку 30% пропускной способности, при этом отмечается меньшее энергопотребление, чем у поезда повышенной массы.

В процессе движения по участку возникают ситуации, когда впереди идущий поезд пакета следует на боковой путь, а идущий позади должен проследовать станцию насквозь, анализ скоростемерных лент из [61] показал, что в такой ситуации

второй поезд начинает снижение скорости, даже с учетом расчетного межпоездного интервала 8 мин, который должен исключать данную ситуацию. Снижающий скорость поезд, увеличивает свое время хода по блок-участку, тем самым нарушая заложенный межпоездной интервал, а значит, если за ним следует еще один поезд, он тоже будет вынужден снизить свою скорость из-за появления кода «Ж» на локомотивном светофоре. При этом, отмечается, что 75% случаев появления кода «Ж» кратковременно и сменяется кодом «З», а машинисты при смене показания сразу начинают снижение скорости на первой ступени служебного торможения, так как не имеют информации о фактическом состоянии впередилежащего участка пути.

Снизить влияние данного эффекта может увеличение скорости движения поездов в горловинах станций, а также скорости проследования станции. Поэтому учеными ВНИИЖТ [116], были разработаны стрелочные переводы марки 1/9, 1/11 с повышенной скоростью движения по отклонению. Переукладка существующих стрелочных переводов соответствующей марки крестовины (без удлинения горловины) позволила повысить скорость движения в горловине в 1,6-2 раза и уменьшить межпоездные интервалы на 30%.

Повышение скоростей движения связано не только с использованием резервов для грузовых поездов, но и с влиянием пассажирских и высокоскоростных поездов на график движения. Оценка влияния пассажирского и высокоскоростного движения на грузовое осуществляется с помощью коэффициента съема. В работе [53] изучаются зависимости провозной и пропускной способности от скорости движения пассажирских и грузовых поездов. Представленная модель показала нелинейную зависимость, авторы отмечают, при расчетах не учтены технологические особенности (график, нормы веса и длины), а также условия безопасности движения.

Эффекты от повышения скоростей можно оценить с помощью эксплуатационных и экономических показателей [117; 118], увеличение скорости приводит к

уменьшению оборота вагона и снижению себестоимости перевозок. Однако увеличивая скорости движения, возрастают затраты на энергоснабжение, поэтому задача повышения скоростей движения на участке носит оптимизационный характер.

1.1.2 Изменение технологии работы железнодорожного участка

Изменение технического оснащения участка с целью повышения пропускной способности может сказаться на технологии работы станций и перегонов, например, может измениться коэффициент съема, либо увеличиться несинхронность подачи поездов [119; 120].

Важным аспектом реализации пропускной способности является проведение капитальных ремонтов, оказывающих значительное влияние на технологию работы участка и направления в целом, в работах [121; 122] изучается влияние времени закрытия перегона и разных способов восстановления графика. В работе [123], автор отмечает, что на сам процесс выполнения «окна» влияет множество факторов, таких как техническое состояние путевых машин, их задействование в других работах, согласованность служб выполняющих работы, неравномерность движения и влияние пассажирских поездов, вплоть до отмены «окон». Для снижения потерь в организации проведения «окон» и влияния на них человеческого фактора, необходимо применение автоматизированной системы анализа и планирования выполнения «окон».

На пропускную способность может оказывать значительное влияние работа технических станций. В работах [124–127], авторы исследуют зависимость пропускной способности участка от времени занятия путей технической станции. В заключении приводится вывод о том, что не всегда увеличение числа путей будет приводить к увеличению пропускной способности, т.к. возможна нехватка тягового обеспечения. Поэтому в первую очередь необходимо выявлять и устранять «узкие места» системы железнодорожного транспорта.

Оценка узких мест при сокращении межпоездного интервала производилась с помощью имитационного моделирования участка Свердловской железной дороги. В результате анализа результатов экспериментов, ученые УрГУПС в рамках научно-исследовательской работы [6], определили наиболее сдерживающий элемент – загрузка бригад пунктов технического обслуживания (ПТО), а в некоторых случаях также путевое развитие станций. В рамках проведенных экспериментов, без изменения технического оснащения ограничивающих станций, дальнейшее увеличение пропускной способности за счет средств интервального регулирования становится невозможным.

1.1.3 Расстановка проходных светофоров

Длина блок-участков по существующей методике расстановки проходных светофоров определяется двумя составляющими:

- необходимостью обеспечения одинакового времени хода по блок-участкам (для выполнения расчетного межпоездного интервала);
- необходимостью выполнения полного служебного торможения в пределах одного блок-участка.

Расстановка проходных сигналов производится по кривой времени хода расчетного поезда (для магистральных участков это грузовой поезд наибольшей массы, для пригородных участков – электропоезд). После выполнения построения кривых скоростей определяется блок-участок с наихудшими условиями, он будет определять расстановку сигналов на протяжении всего перегона. Получается, что большую часть маршрута, поезд движется по блок-участкам, в которых есть запас, определенный наихудшим блок-участком. Это означает, что существует возможность изменить методику расстановки проходных светофоров, так, чтобы сократить длину блок-участков. Альтернативным способом становится расстановка проходных сигналов по тормозным путям, в работе [22], автор приводит сравнение способов расстановки сигналов, в результате расстановки по тормозным путям,

число блок-участков увеличивается, а межпоездной интервал сокращается примерно на 10%.

1.2 Применение технологий соединенного поезда и виртуальной сцепки поездов

1.2.1 Соединенный поезд

Одним из способов повышения пропускной и провозной способностей железных дорог является применение технологии ведения соединенных поездов. Впервые применять соединенные поезда стали во время капитального ремонта еще в 1970 г., тогда соединенные поезда применялись как кратковременный способ форсирования пропускной способности, это позволяло продлевать «окна», а также быстрее восстанавливать график движения поездов. Для применения на постоянной основе, как способа освоения возрастающих объемов перевозок, данная технология не подходила по следующим причинам:

- технические станции не были готовы к работе со сверхдлинными поездами;
- отсутствовали технические средства синхронизации тяги и торможения локомотивов.

Использование соединенных поездов после реконструкции (удлинения путей) лимитирующих станций, позволило повысить размеры движения на 36% [107].

В настоящее время средняя полезная длина приемоотправочных путей увеличилась, а самое главное, появились разработки позволяющие автоматизировать движение поездов с распределенной тягой (ИСАВП-РТ, Консул-Т) [128; 129].

Оценка эффективности применения соединенных поездов на постоянной основе проводилась в работе [130], расчеты показывают что пропускная способность при этом снижается на 1-8%, а провозная возрастает на 4-27% в зависимости от ходовой скорости и доли соединенных поездов. Анализ результатов эксплуатации соединенных поездов проведен в работах [131; 132], выводы аналогичны. Исполь-

зование технологии актуально для участков, исчерпывающих возможности пропускной и провозной способности, это связано с индивидуальными особенностями участка и требует технико-экономических обоснований. Отмечается необходимость реконструкции путевого развития, а также проверки по обеспечению межпоездного интервала устройствами электроснабжения.

Варианты реконструкции под соединенные поезда рассматриваются в [133], на основе анализа работы станции, узким местом становится горловина, необходимо строительство вытяжного пути, а также удлинение приемо-отправочного пути, чтобы исключить занятие горловины составом.

Методики экономической оценки применения технологии соединенного поезда выполнены в работах [58; 134], особенно эффективно применение технологии во время технологических «окон» и капитальных ремонтов.

К основным недостаткам соединенных поездов можно отнести значительное время необходимое на физическое соединение поездов и возможное занятие перегона. С развитием локомотивных устройств и ростом покрытия участков железных дорог радиосвязью, становятся возможными поездки по технологии виртуальной сцепки (ВСЦ) [135–137], которая позволяет повысить пропускную способность напряженного участка и при этом не требует удлиненных путей или длительного времени на сцепку.

1.2.2 Технология виртуальной сцепки

Технология виртуальной сцепки обеспечивает движение двух и более последовательно идущих поездов в режиме автоведения с учетом динамических свойств впередиидущего, за счет организации постоянного обмена информацией между локомотивами по радиоканалу [59; 138–140] (рисунок 1.2).

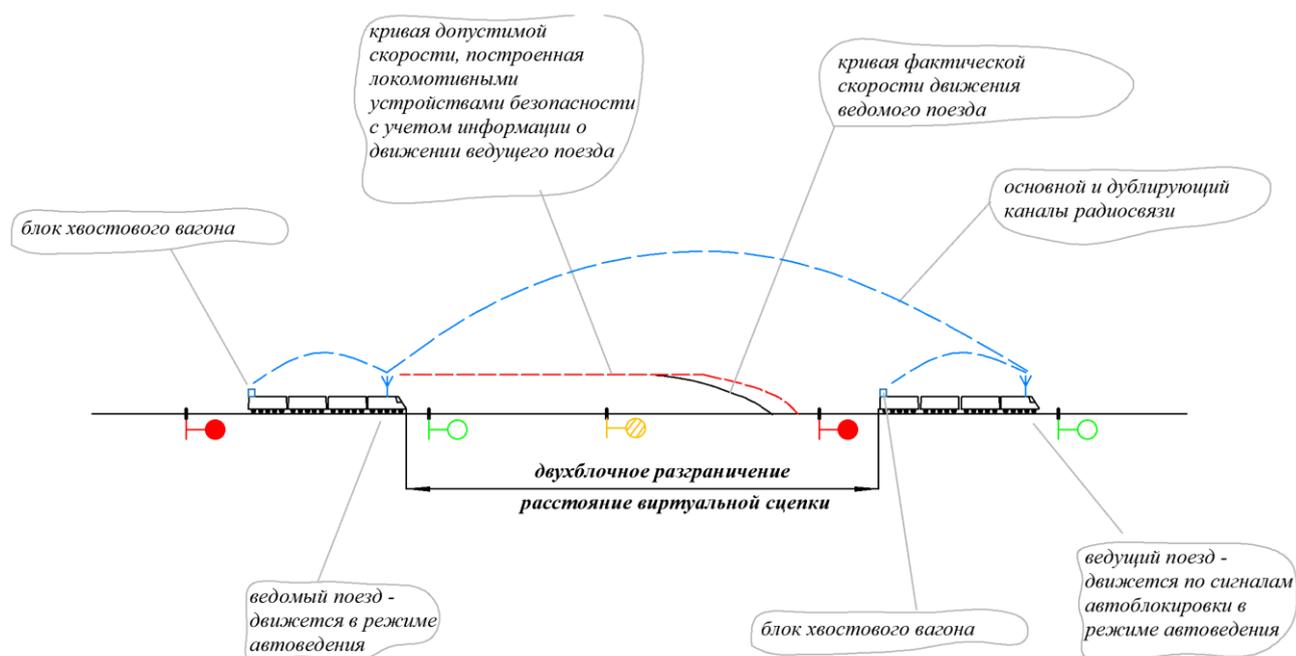


Рисунок 1.2 – Технология виртуальной сцепки поездов

Реализована ВСЦ на оборудовании системы ИСАВП-РТ-М, разрабатываемом компанией «АВП Технологии» с 2017 года.

Впервые технология ВСЦ была опробована на 5 локомотивах ЗЭС5К на участке Хабаровск-Смоляниново 1 ноября 2019 года [141].

Технологию ведения соединенного поезда и виртуально соединенных поездов часто сравнивают из-за наличия на локомотивах системы автоматизированного ведения поезда: для соединенного поезда это управление распределенной тягой, для ВСЦ – управление ведомым поездом в режиме автоведения.

Для обеспечения возможного интенсивного движения при применении технологий соединенного поезда или ВСЦ, важным становится вопрос оптимизации использования ресурсов систем тягового электроснабжения. Данный вопрос, по результатам опытных поездок, изучается в работах [142–144], в заключении авторы делают следующие выводы: технология ВСЦ расходует меньше энергии, при этом обеспечивает меньшие потери, меньшую температуру в контактной и отсасывающей сети, чем соединенный поезд.

Оценка возможностей тяговой подстанции по обеспечению уменьшенного межпоездного интервала, проводится в работе [145], также приводится сравнение

оптимального межпоездного интервала, по условиям электроснабжения, для нерегулируемой и регулируемой систем тягового электроснабжения. Применение устройств автоматического регулирования напряжения позволяет на рассматриваемом участке сократить межпоездной интервал с 15 до 7 мин.

Результаты опытных поездок по технологии ВСЦ описаны в работах [146; 147], отмечается увеличение пропускной способности участка на 10-15% без строительства инфраструктуры, однако авторы отмечают, что при сокращении межпоездного интервала, критическим становятся моменты входа на станцию и выхода со станции с уменьшенным интервалом, существующие горловины могут стать ограничивающими для эффективного применения технологии ВСЦ.

Известные технические решения, направленные на сокращение интервала попутного отправления, предполагающие установку первого проходного светофора на ординате входного светофора [11], не могут в полной мере обеспечить требуемые интервалы отправления поездов в ВСЦ, поскольку могут быть реализованы только для тех станций, длина горловин которых составляет не менее 1500 м.

1.3 Сокращение межпоездных интервалов

Одной из характеристик пропускной способности линий со специализацией главных путей по направлениям движения является межпоездной интервал. Существующая организация движения «под зеленый, на зеленый» основана на том, что между поездами сохраняется расстояние равное трем блок-участкам (трем тормозным путям), так поезда могут следовать постоянно с максимально разрешенной скоростью, если будет обеспечиваться синхронность движения. В реальных условиях межпоездные интервалы постоянно колеблются по разным причинам: разная квалификация машинистов (реакция на смену показаний или проезд участка с ограничением скорости), разный план и профиль пути, отличающиеся по длине блок-участки [61].

На межпоездной интервал можно повлиять непосредственно через системы интервального регулирования движения поездов (СИРДП), так в работе [148], аналитически оценивается влияние различных типов СИРДП на пропускную способность, отмечается что наличие защитного участка за светофором с запрещающим показанием значительно снижает пропускную способность. В работах [51; 149] ученые НИИАС оценивают влияние межпоездного интервала на пропускную способность с помощью моделирования, отмечается что строительство разгонных путей и параллельных вставок позволяет сократить межпоездной интервал. Однако не определяются зависимости между межпоездным интервалом и длиной разгонного пути.

Сравнение возможных межпоездных интервалов при разных СИРДП представлено на рисунке 1.3.

На рисунке 1.3а представлен межпоездной интервал при трехблочном разграничении, в таком случае график движения поездов разрабатывается с учетом возможности движения с установленной скоростью «под зеленый, на зеленый» сигнал светофора, это значит, что при проследовании проходного светофора с зеленым показанием, сигнал следующего проходного светофора должен быть также зеленым. Для этого между поездами должно сохраняться расстояние равное трем блок-участкам и длине поезда, а межпоездной интервал составляет 8-10 мин. При таком движении уменьшение расстояния между поездами невозможно без оборудования их дополнительными локомотивным устройствами безопасности (БЛОК, САУТ). Применение этих систем позволяет выполнять прицельное торможение к светофору с запрещающим сигналом в автоматическом режиме, а значит при достаточной видимости возможно сократить межпоездной интервал (рисунок 1.3б). Такая организация движения позволит сократить межпоездной интервал до 6-8 мин, однако сильно увеличивает вероятность использования режима полного служебного торможения.

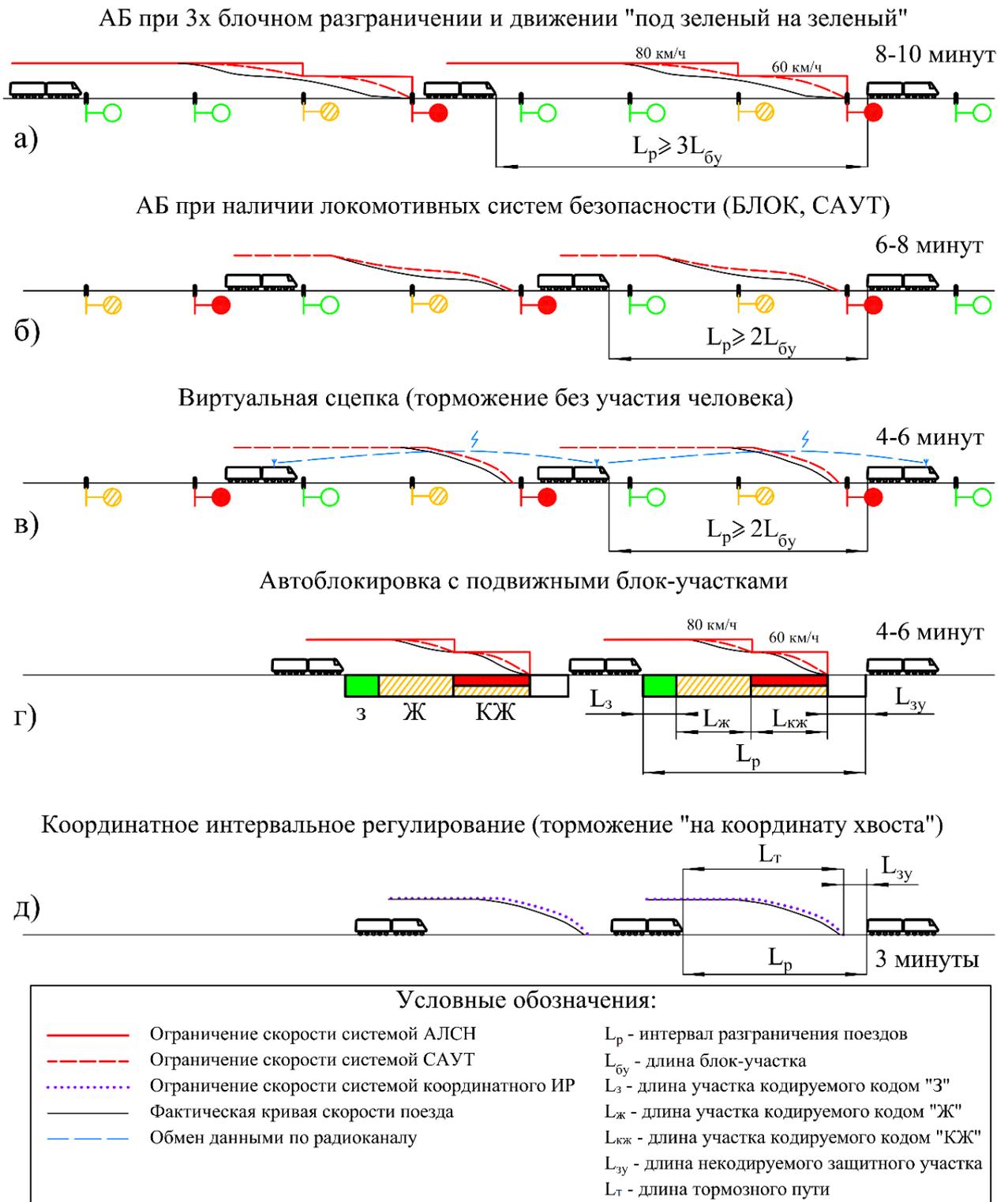


Рисунок 1.3 – Сравнение межпоездных интервалов

Для обеспечения движения без потерь скорости, необходимым условием будет являться постоянное, своевременное переключение впередилежащего проход-

ного сигнала с желтого показания на зеленое, чтобы исключить даже кратковременное появление сигнала «КЖ», и неизбежное в этом случае начало полного служебного торможения. Однако машинист всё еще (как в случае, показанном на рисунке 1.3а) не может достоверно знать, что очередной красный сигнал вовремя переключится на желтый, и вынужден заранее снижать скорость поезда в ожидании переключения следующего сигнала на разрешающее показание.

Избавиться от недостатков предыдущего способа возможно с помощью применения технологии ВСЦ (рисунок 1.3в). Определяющим фактором становится наличие в локомотиве ведомого поезда информации о динамике впередиидущего поезда. Это позволяет системе автоведения правильно выбирать скоростной режим, а системам автоматического управления торможением гарантировать безопасное движение на уменьшенном межпоездном интервале без снижения скорости. При этом, в случае возникновения нештатных ситуаций (неисправность устройств ВСЦ, разрыв радиосвязи, аварийная остановка ведущего поезда, излом рельса впередилежащего блок-участка и др.) возможна прицельная остановка поезда перед красным показанием проходного светофора. Таким образом, применение ВСЦ позволяет безопасно сократить расстояние между поездами до двух блок-участков и длины поезда, при этом межпоездной интервал может составлять 4-5 мин.

С развитием локомотивных систем безопасности становится возможным сокращение межпоездного интервала за счет появления на локомотиве дополнительной информации о впередилежащем участке пути [63], которая позволит безопасно сблизить попутно следующие поезда. К таким системам относятся локомотивные комплексы безопасности БЛОК, САУТ, позволяющие выполнять прицельное торможение в автоматическом режиме. Используя эти комплексы совместно с современными СИРДП, можно сократить межпоездной интервал за счет применения «подвижного блок-участка» [150] (рисунок 1.3г). СИРДП с подвижными блок-участками внедрены на многих участках железных дорог, и позволяют повысить пропускную способность на 10-15% за счет сокращения межпоездного интервала [12; 13; 151], однако требуют капиталовложений на переоборудование перегонов.

Автоблокировка с подвижным блок-участком постоянно развивается, ее смогли адаптировать для высокоскоростного движения за счет повышения значности локомотивного светофора (отображается состояние до 6 блок-участков, а также буквенные и цифровые индексы уточняющие разрешенную скорость) [14; 152].

Вопросу изучения влияния современных технологий интервального регулирования на пропускную и провозную способности посвящены работы [60; 153]. Особое внимание уделено определению баланса между повышением числа поездов и сокращением межпоездных интервалов, показано, что эффективное применение современных систем интервального регулирования возможно при уменьшении расстояния между поездами.

Наименьший межпоездной интервал возможен при отказе от проходных светофоров, рельсовых цепей и переходе на принцип управления поездом по координате хвоста впередиидущего поезда. Координатная система интервального регулирования (рисунок 1.3д) возможна при расширении функций локомотивных устройств безопасности и повышении точности позиционирования подвижных единиц спутниковыми навигационными системами. Среди технических средств, позволяющих организовать координатную СИРДП существуют инновационные, основанные на использовании оптоволоконных датчиков прокладываемых вдоль железнодорожных путей [154–157].

Разработке алгоритмического и методического обеспечения координатной системы посвящены работы [41; 158], в них отражены основные принципы функционирования таких систем, предложены функциональные схемы. Аналитический расчет межпоездного интервала при управлении на хвост поезда с учетом условий передачи информации по радиоканалу и экстренного торможения впередиидущего поезда дан в [76; 77]. А устройства безопасности и системы передачи данных на локомотивах постоянно совершенствуются [159].

1.3.1 Зарубежный опыт повышения пропускных способностей за счет сокращения межпоездных интервалов

В статье [93] ученых из Европы применяется математический аппарат сетей Петри для анализа пропускной способности железнодорожного участка с применением технологии ВСЦ. Рассматривается ситуация частичного и полного отказа устройств ВСЦ с последующим переходом на управление поездом по сигналам автоблокировки при движении по перегону и в стрелочной горловине. Оценивается зависимость пропускной способности от вероятности переходов из режима ВСЦ в режим автоблокировки и наоборот. Ожидается, что при наименьшей вероятности перехода из ВСЦ в режим автоблокировки получается наибольшее значение пропускной способности. Целью моделирования авторы ставили разработку инструментов для дальнейшей работы, поэтому полученные значения далеки от реальных: поезд при ВСЦ движется с разграничением 200 м, а при автоблокировке – 600 м; длины элементарных участков пути равны и составляют 200 м.

Ученые из Великобритании в статье [160] проводят сравнение пропускных способностей железнодорожного участка, вычисленных аналитически. Рассматриваются разные СИРДП: трех и четырехблочные фиксированные блок-участки, подвижные блок-участки. Также оценивается применение технологии ВСЦ с торможением ведомого поезда, учитывающим тормозной путь ведущего поезда, такая СИРДП повышает пропускную способность на 59% по сравнению с классическими автоблокировками.

Отличием Американских железных дорог является то, что 2/3 их протяженности составляют однопутные участки. В таких случаях особое внимание уделяется технологиям скрещения и обгона поездов. В исследовании [97] оценивается время, затрачиваемое на скрещение при разных схемах скрещения, различных СИРДП (с фиксированными и подвижными блок-участками). Результаты моделирования показали, что применение пакетного графика с сокращенным межпоездным интервалом, реализуемым на подвижных блок-участках, является наиболее эффективным для снижения задержек, вызываемых процессом скрещения поездов,

что в итоге будет способствовать повышению пропускной способности участка в целом.

Существует множество работ, в которых ученые изучают, предлагают и совершенствуют алгоритмы вычисления безопасного расстояния между поездами при использовании дополнительной информации о динамике впередиидущего поезда. Много работ на данную тему выполнено в Китае. Так в работе [161] предлагают сокращать расстояние между поездами в ВСЦ за счет тормозного пути впередиидущего поезда, полагая что он не может остановиться мгновенно. Предложенный метод позволяет повысить скорость ведомого поезда при сокращении расстояния до ведущего поезда (расстояния ВСЦ). В работе [101], авторы развивают теорию из своей предыдущей работы и рассматривают движение трех и более поездов в ВСЦ. Заостряется внимание на предотвращении столкновения третьего в группе поезда со вторым, при возникшем столкновении первого и второго поезда. Для этого авторы предлагают повысить скорость обмена информацией между поездами, но предупреждают о том, что скорость не должна быть слишком высока иначе произойдет перегрузка системы передачи данных. Вопрос столкновения двух поездов ВСЦ разбирается в работе [102], ученые предлагают алгоритм вычисления безопасного расстояния между поездами и между группами поездов в ВСЦ с защитой от превышения скорости, это позволяет значительно снизить кинетическую энергию при возникновении аварийной ситуации. Алгоритмы управления множеством поездов ВСЦ с возможным влиянием помех и погрешностей измерений рассматриваются в работах [162; 163]. Во многих работах, связанных с алгоритмами управления ВСЦ, появляются расчеты для больших групп поездов, рассматривая данную технологию как координатную СИРДП, в которой позиционирование поездов производится с помощью спутниковых систем.

Стирание границ между поездами в виде блок-участков (фиксированных или подвижных) и радиоканалов, приводит к тому, что некоторые ученые начинают рассматривать железнодорожный трафик как автомобильный. На данную тему опубликованы исследования [164; 165] в которых накопленный опыт расчета авто-

мобильного трафика [166] адаптируется к железнодорожному движению. При таком подходе процесс объединения и разъединения пары поездов ВСЦ рассматривают в движении, а алгоритм управления основывается на поддержании постоянного расстояния между поездами. В работе [165] предлагается метод снижающий влияние погрешности измерения положения поезда за счет применения нечеткой логики.

В работе [167] проводится вычисление возможных интервалов попутного отправления и попутного прибытия на высокоскоростной железнодорожной пассажирской линии. Оценивается влияние изменения скорости и ускорения торможения на длину тормозного пути и станционные интервалы. При этом в расчетах станционных интервалов учитывается добавочное время, необходимое для пассажиропотока, данное время меняется в зависимости от величины города и наличия пассажиров с габаритным грузом. В заключении сравниваются расчетные значения интервалов с фактическими на определенных станциях и делается вывод о возможности сокращения фактических значений, однако не предлагается никаких мероприятий для реализации.

Анализ работ зарубежных авторов показал, что технологию ВСЦ рассматривают как:

- технологию для пассажирского движения (поезда короткие, ускорения высокие);
- этап развития Европейской системы управления движением поездов ERTMS уровня 3, а значит при моделировании и расчетах исходят из того, что на участках реализованы подвижные блок-участки.

Основное внимание зарубежных ученых направлено на вычисление алгоритмов управления поездами в ВСЦ с учетом перечисленных ограничений. В то время как в России технология ВСЦ рассматривается для повышения пропускной способности участка при грузовом движении.

Результаты исследований в данной главе опубликованы в [109].

Цель и задачи исследования

Задача повышения пропускных способностей относится к тем, которые требуют комплексного подхода – выполнения моделирования, оценки рисков, технико-экономических и оптимизационных расчетов. На ряду с классическими способами повышения пропускных способностей появляются новые, основанные на усилении влияния бортовых систем автоматики на процесс интервального регулирования движения поездов. Применение ВСЦ позволяет получить увеличение пропускной способности за счет сокращения межпоездного интервала на перегоне без снижения скорости.

Пропускная способность всех последовательных элементов транспортной системы должна быть согласована, уменьшение межпоездного интервала на перегоне требует сокращения интервала попутного отправления и интервала попутного прибытия. Поэтому необходимо исследовать возможности и ограничения существующих технических и технологических решений на станции. На данный момент не до конца исследован вопрос отправления и приема поездов, с интервалом меньшим, чем расчетный при трехблочном разграничении движения поездов.

Целью данного диссертационного исследования является совершенствование систем железнодорожной автоматики для повышения пропускной способности участков железных дорог при использовании технологии виртуальной сцепки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать способы повышения пропускной способности участков железных дорог.
2. Разработать методику моделирования движения поездов на основе данных о фактическом движении поездов.
3. Определить требования к станционным системам автоматики и телемеханики на основании моделирования попутного отправления и прибытия поездов в виртуальной сцепке.
4. Разработать технические решения, позволяющие выполнять попутное отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом времени меньшим, чем расчетный, при трехблочном разграничении движения поездов.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ

2.1 Способы моделирования движения поезда

В зависимости от цели применяют различные способы моделирования движения поездов. Существует два основных способа моделирования:

- выполнение тягового расчета [78];
- выполнение имитационного моделирования на моделях железнодорожных станций и полигонов [168–170].

2.1.1 Тяговые расчеты

Целью выполнения тяговых расчетов является определение оптимальной траектории движения поезда, с определенными параметрами, по заданному участку. Можно сказать, что основная задача выполнения тяговых расчетов – наиболее точно описать поведение поезда, как сложной системы, при выполнении движения по заданному участку с заданным расписанием при соблюдении энергоэффективности движения. Результаты тяговых расчетов в основном используются при проектировании участков железных дорог и эксплуатации в локомотивных системах безопасности, рассчитывающих допустимую скорость во время движения [78]. Кроме этого, тяговые расчеты могут являться частью систем имитационного моделирования [57].

Выполнение тяговых расчетов регламентировано правилами [171]. Существуют разные способы их выполнения, но в основном используют специализированные программные комплексы [172]. К недостаткам тяговых расчетов можно отнести:

- трудоёмкость выполнения при необходимости рассчитать несколько вариантов;

- невозможность с малым шагом изменять ускорение, развиваемое локомотивом;
- платные лицензии на программное обеспечение.

Определяющим недостатком тяговых расчетов, из-за которого необходимо разработать методику моделирования движения поездов в виртуальной сцепке становится невозможность в широком диапазоне и с малым шагом менять ускорение, развиваемое локомотивом, потому что особый интерес представляют моменты разгона и замедления поездов при отправлении и приеме.

2.1.2 Имитационное моделирование

В отличие от тяговых расчетов, при имитационном моделировании неотъемлемой частью является увязка движения поезда с технологией работы моделируемой станции или участка. Отсюда кратно повышается количество возможных целей выполнения имитационного моделирования.

Для выполнения имитационного моделирования существует множество различных программных комплексов [170]. В большинстве комплексов, скорость движения поезда определяется необходимостью выполнения задаваемого расписания, но есть и такие, в которых уже встроены модули выполняющие тяговый расчет [57], либо есть возможность разработки собственного модуля выполняющего расчет кривой скорости поезда [173].

Построение имитационной модели конкретного участка для изучения приема и отправления поездов в виртуальной сцепке является нецелесообразным, поскольку предварительно необходимо изучить изменение расстояния и времени между поездами в широком диапазоне возможных ускорений локомотивов, и большом количестве возможных вариантов длин перегонных и станционных участков. Разработка большого числа вариантов путевого развития и добавление функционала позволяющего изменять ускорения поездов будет неоправданно трудоемкой, при том, что в большинстве программных комплексов вообще отсутствует возможность подключения сторонних модулей и библиотек.

2.2 Моделирование движения поезда по значениям ускорений

Целью моделирования движения поездов в виртуальной сцепке является изучение изменения расстояния между головой ведомого поезда и хвостом ведущего. Когда оба поезда будут двигаться с максимальной установленной скоростью, расстояние между поездами не изменяется, поэтому необходимо изучить моменты разгона и замедления поездов при попутном приеме и отправлении поездов.

Если исключить возникновение нештатных ситуаций, то движение поезда с момента отправления до остановки можно представить как составную трех частей: разгон после трогания до максимальной установленной скорости, поддержание установленной скорости и торможение с последующей остановкой (рисунок 2.1). При этом в фазе разгона может быть выполнена проверка тормозов согласно нормативным документам [174; 175].



Рисунок 2.1 – Кривая скорости движения поезда

Ускорение, возникающее в процессе движения поезда, можно определить как функцию:

$$a = f(F_K, m, V, u_{\text{ПР}}), \quad (2.1)$$

где a – ускорение поезда, м/с²;

F_K – сила тяги локомотива, Н/кН;

$m_{\text{П}}$ – масса поезда, т;

V – скорость поезда, м/с;

$u_{\text{ПР}}$ – средневзвешенный по длине поезда уклон пути, ‰.

Чтобы получить значения ускорений в зависимости от перечисленных величин (2.1), необходимо провести анализ статистики о движении реальных поездов. Для описания процесса ускорения одного поезда, удобно будет пользоваться терминами среднее ускорение разгона и среднее ускорение торможения, обозначающими среднеарифметическое значение ускорения на заданном промежутке (рисунок 2.1). На основании полученных зависимостей можно будет проводить построение расчетной кривой скорости движения поезда при попутном отправлении и приеме.

Из теории тяги известно дифференциальное уравнение движения поезда, описывающее поезд как материальную точку приведенной массы $m_{\text{П}}$ на которую действуют силы тяги F , торможения B , основного $W_{\text{О}}$ и дополнительного сопротивления $W_{\text{Д}}$:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_{\text{П}}} (F - B - W_{\text{О}} - W_{\text{Д}}). \quad (2.2)$$

Тогда после ввода удельных сил, уравнение движения поезда (2.2) можно записать в следующем виде:

$$v \frac{dv}{ds} = \frac{\varepsilon}{1 + \gamma} (f - w - b), \quad (2.3)$$

где f – удельная сила тяги, Н/кН;

w – удельная сила основного и дополнительного сопротивления, Н/кН;

b – удельная сила торможения, Н/кН;

ε – коэффициент, учитывающий размерность переменных заданных в единицах не соответствующих СИ;

γ – коэффициент инерции вращающихся масс.

Для вычислений удобно использовать интегрирование по интервалам времени, поскольку необходимо изучить влияние задержки отправления ведомого поезда на изменение расстояния до хвоста ведущего поезда.

При интегрировании уравнения движения поезда (2.3) методом Эйлера, по интервалам времени, получаем следующие расчетные формулы:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t, \quad (2.4)$$

$$V_i = V_{i-1} + K(f - w - b)\Delta t, \quad (2.5)$$

$$S_i = S_{i-1} + \frac{V_i - V_{i-1}}{2} \Delta t, \quad (2.6)$$

где $K = \frac{\varepsilon}{1 + \gamma}$ – коэффициент, учитывающий размерность и инерцию вращающихся масс;

Δt – шаг интегрирования по времени;

Δt – шаг интегрирования по времени;

i – номер шага интегрирования.

Наиболее сложными для расчета являются вычисления равнодействующей силы, которая будет определять, ускорится или замедляется поезд. При этом ускорение поезда a_i можно определить по изменению скорости за шаг интегрирования:

$$a_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t}. \quad (2.7)$$

Тогда, из выражений (2.5) и (2.7) можно выразить следующее:

$$\begin{aligned} V_i - V_{i-1} &= K(f - w - b)\Delta t, \\ a_i &= K(f - w - b). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Таким образом, можно упростить процесс моделирования движения поезда если вместо вычисления равнодействующей силы задавать значение ускорения как функцию от многих переменных (2.1), полученное на основе статистики реальных поездов. Выражение (2.5) примет вид:

$$V_i = V_{i-1} + a_i(f_T, m, u_{\text{ПР}}, V_{i-1})\Delta t, \quad (2.9)$$

где a_i – значение ускорение поезда в i момент времени полученное на основании статистики реальных поездов в зависимости от силы тяги f_T , массы поезда m , уклона $u_{\text{ПР}}$ и скорости V , м/с².

2.3 Анализ данных реальных поездов

2.3.1 Расчет ускорения поездов

Целью анализа является определение зависимостей ускорения от силы тяги, уклона, скорости и массы поезда.

Источниками статистических данных о выполненных передвижениях поездов являются:

– регистратор параметров САУТ-ЦМ/485 (РПС), конструктивно он является одним из модулей блока электроники и коммутации (БЭК/БЭК2) локомотивной аппаратуры САУТ-ЦМ/485 [176; 177];

– регистратор параметров микропроцессорной системы управления локомотивом (РПМ), предназначен для контроля работы локомотива и аппаратуры микропроцессорной системы управления и диагностики (МПСУиД) в процессе эксплуатации [178; 179].

Для анализа использован подготовленный С.В. Бушуевым массив данных, который включает в себе информацию о движении 105 поездов различной массы и длины, с локомотивами 2ЭС6 по грузонапряженному участку Екатеринбург – Войновка в течении недели [7; 180]. Среди всех записываемых РПС и РПМ параметров, для анализа ускорения поездов выбраны данные:

- пройденный путь;
- время;
- фактическая скорость;
- масса поезда;
- уклон пути;
- длины блок-участков;
- сила тяги.

Среди записываемых регистраторами данных отсутствует ускорение поезда, поэтому необходимо его рассчитать. Для вычисления ускорения можно воспользоваться следующими способами:

- определить ускорение как изменение скорости за интервал пройденного пути;
- определить ускорение как изменение скорости за интервал времени.

Теоретически не должно быть разницы между результатами вычисления ускорения по интервалам времени и пути, но на практике для вычисления будут использованы измеренные датчиками и записанные регистраторами значения. Запись регистрируемых параметров в РПС происходит по мере их изменения, для значений скорости изменение составляет 1 км/ч, однако инерционность системы приводит к тому, что иногда фиксируются изменения скорости сразу на 5 км/ч. Поэтому на низких скоростях при малом интервале усреднения, возможны ошибки при вычислении ускорения. Оба способа расчета зависят от величины интервала

усреднения, поскольку фактическая скорость поезда в процессе движения постоянно изменяется. При этом определить какой из способов дает наиболее точные результаты становится сложно (помимо выбросов на расчет будет влиять величина интервала усреднения), а сравнить их между собой не представляется возможным. В данном исследовании ускорение поезда для удобства будет определяться по интервалам времени, т.к. для моделирования движения поезда выбрано интегрирование уравнения движения поезда по времени, а одной из значимых переменных при моделировании движения поездов в виртуальной сцепке становится интервал попутного отправления ведомого поезда.

Необходимо определить наиболее адекватный интервал усреднения. Для этого в [180], была определена зависимость интервала усреднения по времени, от значений ускорений, получаемых в результате расчета с выбранным интервалом (рисунок 2.2).

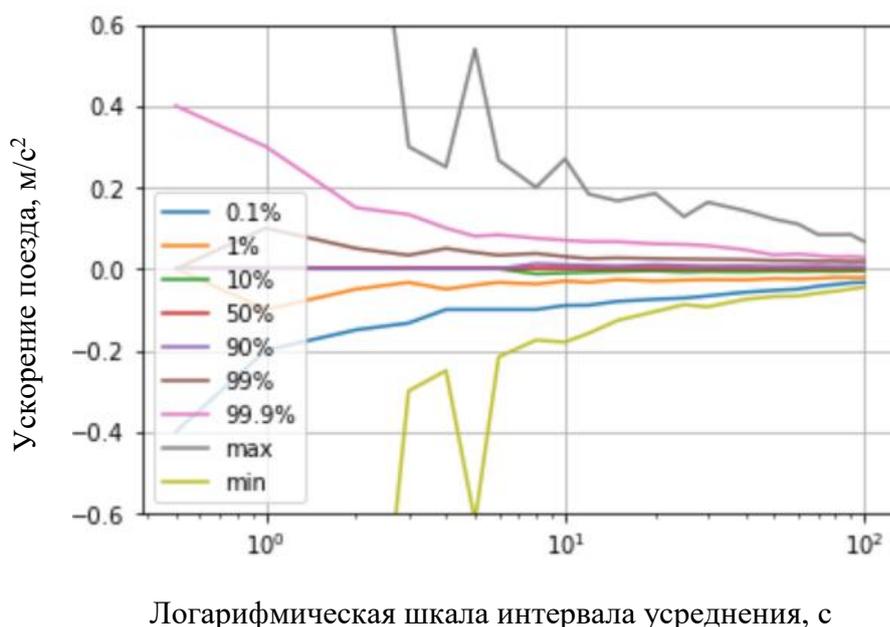


Рисунок 2.2 – Зависимость расчетного ускорения (по квантилям) от интервала усреднения [180]

На рисунке 2.2 представлена зависимость значений ускорений (по квантилям) от величины интервала усреднения, полученная С.В. Бушуевым в работе

[180], видно высокую чувствительность при интервале усреднения менее 6 с, а при интервале свыше 10 с значения ускорений линейно стремятся к нулю. Это означает, что для вычислений необходимо использовать интервал усреднения выше 6 с, но менее 10 с.

Рассмотрены гистограммы распределения и описательную статистику выбранных и расчетных данных (рисунки 2.3-2.6).

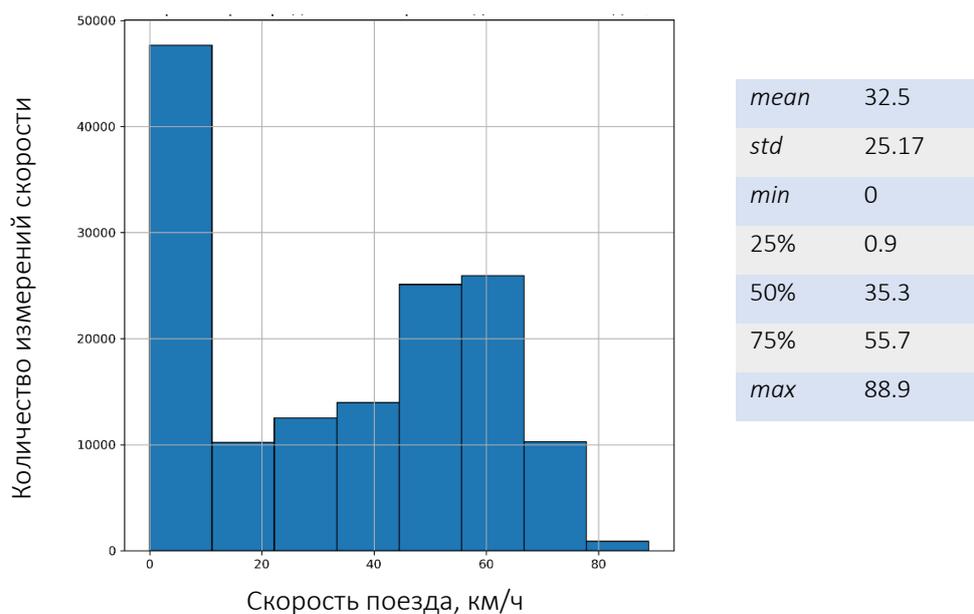


Рисунок 2.3 – Гистограмма распределения скоростей движения поездов

На рисунке 2.3 представлена гистограмма распределения скоростей движения поездов в км/ч и описательная статистика, видно, что в выборке не исключены моменты, когда поезда стояли без движения с включенным регистратором параметров. Распределение двумодальное, на значениях 0 км/ч и 60 км/ч. Поэтому среднее значение скорости составляет всего 32,5 км/ч.

На рисунке 2.4 представлена гистограмма распределения и описательная статистика для выборки масс поездов. По графику видно 3 пика гистограммы, 2900 т, 4300 и 6300 т. Поскольку масса поезда значительно влияет на ускорение, в дальнейшем моделировании необходимо будет выделять как минимум 3 группы поездов по массе.

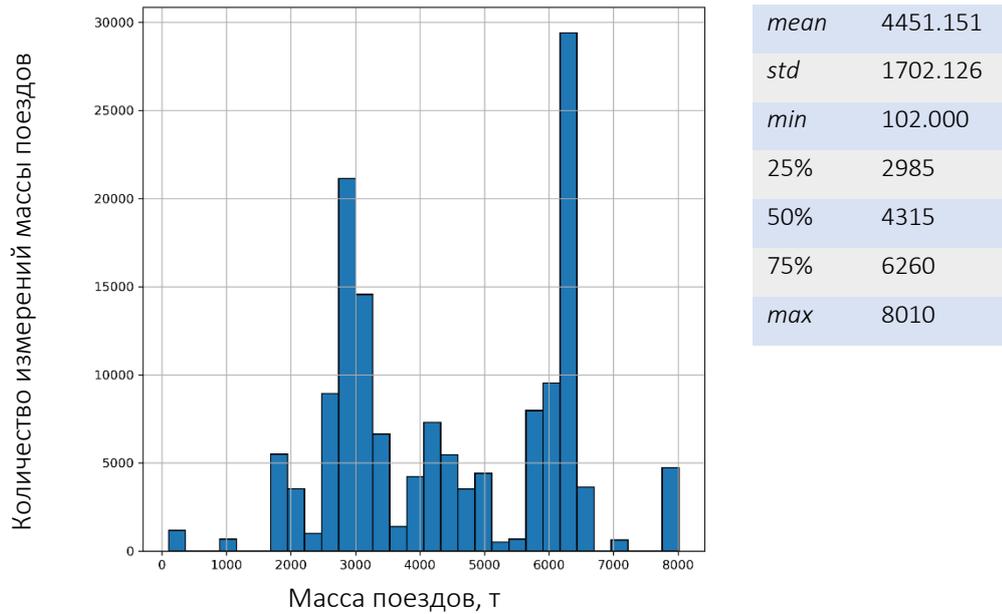


Рисунок 2.4 – Гистограмма распределения массы поездов

На рисунке 2.5 представлена гистограмма распределения и описательная статистика для длин поездов. Видно две группы поездов со средними длинами 71 и 120 условный вагон, также небольшое количество локомотивов в выборке оказалось без состава.

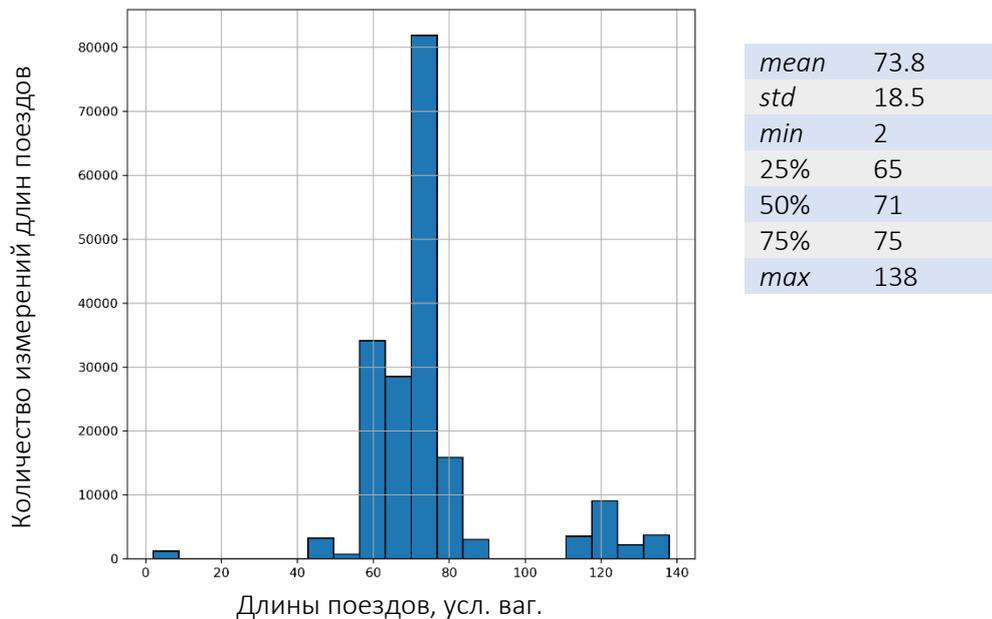


Рисунок 2.5 – Гистограмма распределения длин поездов (в условных вагонах)

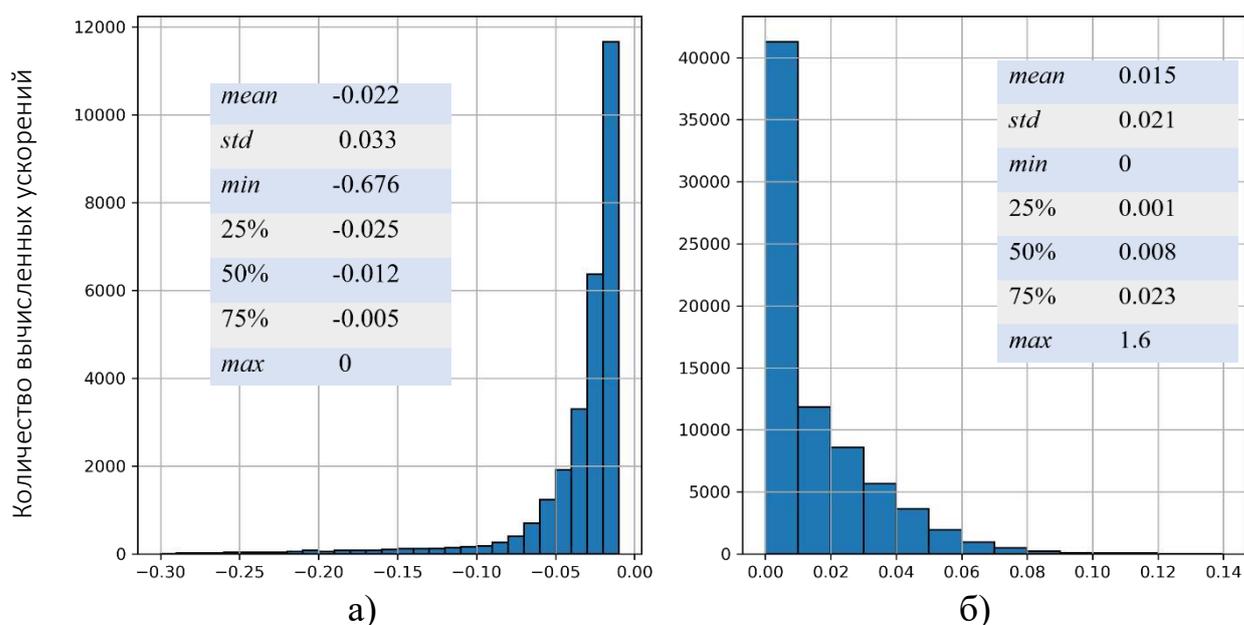


Рисунок 2.6 – Гистограмма распределения ускорений поездов
(а – Ускорение торможения, м/с^2 , б – Ускорение разгона, м/с^2)

На рисунке 2.6 представлены результаты расчетов ускорений (при интервале усреднения б с) для всех поездов, попавших в описанную ранее выборку. Рисунок 2.6а представляет гистограмму распределения ускорений торможения, среднее значение ускорения торможения составляет минус $0,022 \text{ м/с}^2$ при стандартном отклонении $0,033$. На рисунке 2.6б представлена гистограмма распределения ускорений разгона, со средним значением $0,015 \text{ м/с}^2$ и стандартным отклонением $0,021 \text{ м/с}^2$. Значения стандартных отклонений как для ускорения разгона, так и для ускорения торможения говорят о большом разбросе значений. Это связано с множеством факторов, которые влияют на расчет ускорения. Необходимо детально изучить основные факторы, влияющие на значения ускорений поезда, такие как: масса поезда, сила тяги локомотива, скорость поезда, уклон пути.

2.3.2 Расчет средневзвешенного уклона пути

Для определения влияния уклона на ускорение поезда необходимо рассчитать средневзвешенный уклон, действующий на длину всего поезда. Для этого производится расчет скользящего среднего значения уклона с периодом равным длине поезда:

$$u_{\text{ПР}} = \frac{\sum ul}{L_{\text{П}}}, \quad (2.10)$$

где $u_{\text{ПР}}$ – приведенный к длине поезда средневзвешенный уклон пути, ‰;
 $\sum ul$ – сумма произведений значения уклона u и соответствующего элемента пути длиной l , м;
 $L_{\text{П}}$ – длина поезда, м.

На рисунке 2.7 представлена гистограмма распределения средневзвешенного по длине поезда уклона, а также описательная статистика. Значения уклонов распределены нормально со средним значением 0,255 и стандартным отклонением 2,876.

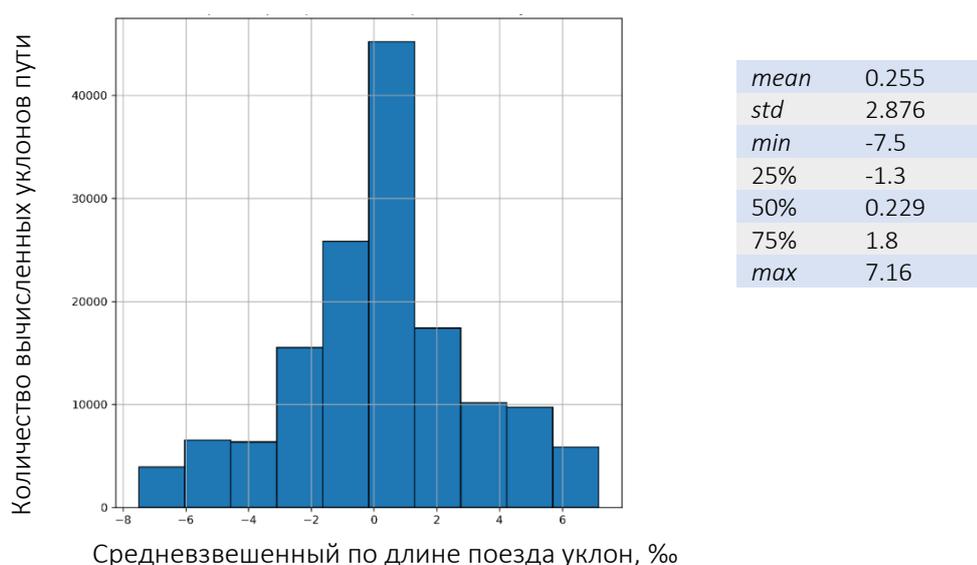


Рисунок 2.7 – Гистограмма распределения средневзвешенного по длине поезда уклона пути

2.3.3 Расчет процента использованной силы тяги

При эксплуатации электровозов 2ЭС6 не используется в полной мере их тяговый потенциал. На отдельных участках сила тяги поддерживается на уровне номинального режима (в том числе, пропорциональное силе тяги значение тока якорей тяговых двигателей). Поэтому потенциально можно определить запас по силе тяги, который может быть использован для увеличения ускорения поезда.

При движении электровоза каждой скорости соответствует значение силы тяги на тяговой характеристике, с учетом схемы включения тяговых электродвигателей (рисунок 2.8).

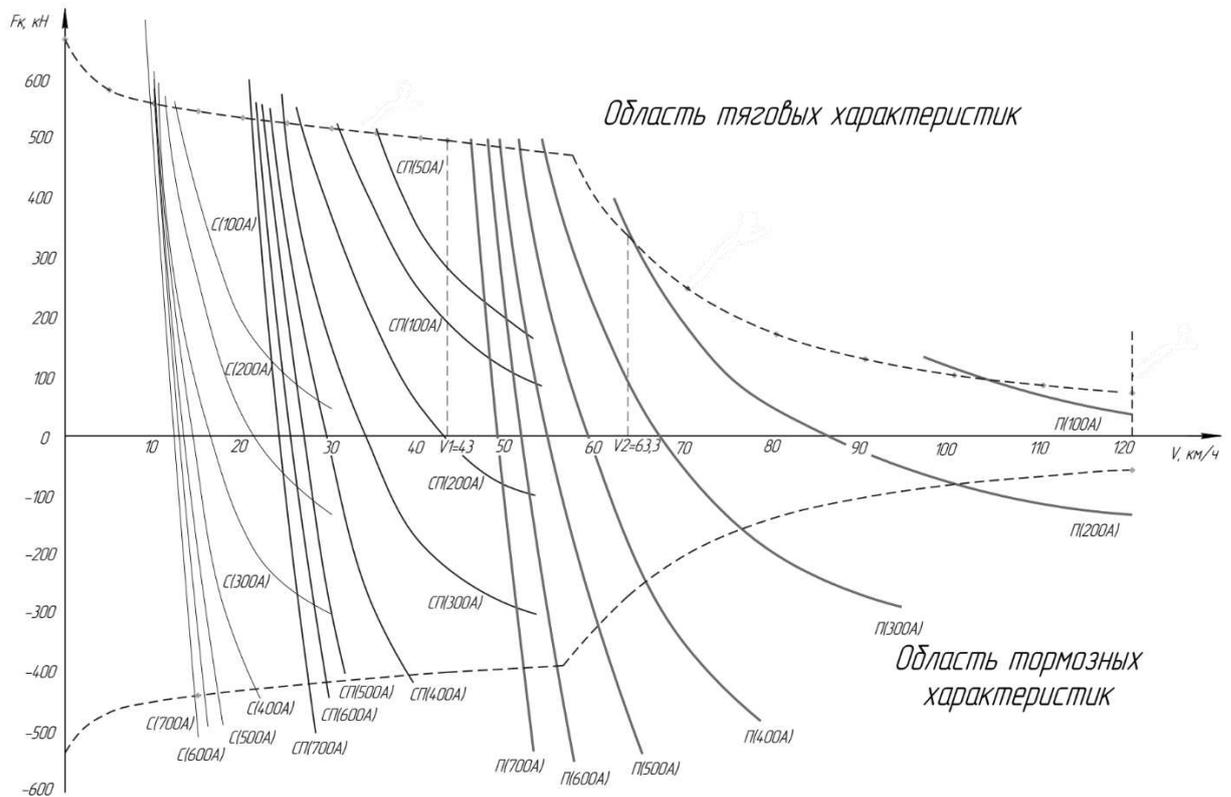


Рисунок 2.8 – Тяговые и тормозные характеристики 2-х секционного электровоза 2ЭС6 [181]

В зависимости от тяговой характеристики и силы тяги одной секции (записывается в РПМ) рассчитана недоиспользованная сила тяги электровоза:

$$\Delta F = \frac{F_{ТХ}}{2} - F_{СЕКЦ}, \quad (2.11)$$

где ΔF – недоиспользованная сила тяги, кН;

$F_{ТХ}$ – сила тяги по тяговой характеристике в зависимости от текущей скорости и схемы включения тяговых электродвигателей, кН;

$F_{СЕКЦ}$ – фактическая сила тяги одной секции электровоза полученная из записей РПМ, кН.

При этом увеличение силы тяги электровоза ограничивается значением минимального ослабления магнитного поля тягового электродвигателя. С большой вероятностью при ослаблении магнитного поля увеличение силы тяги до значения соответствующей точке на тяговой характеристике приведет к проскальзыванию колесной пары. Следовательно, расчет потенциально возможной силы тяги должен быть выполнен на основе адаптивного прогнозирования проскальзывания, по следующим условиям:

- тяговая характеристика электровоза;
- количество и частота проскальзывания колесных пар.

Выражение для определения потенциально возможной силы тяги примет вид:

$$F_{П} = KF_{ТХ} - (1 - K)F_{А}, \quad (2.12)$$

где $F_{П}$ – потенциально возможная сила тяги с учетом проскальзывания колесных пар, кН;

K – вариационный параметр (количество проскальзываний);

$F_{А}$ – адаптивная сила тяги, кН.

Выражение для определения доли используемой силы тяги:

$$\theta_i = \frac{F_i}{F_{Пi}}, \quad (2.13)$$

где θ_i – доля используемой силы тяги электровоза в i момент времени, %;
 F_i – сила тяги электровоза в i момент времени, кН;
 F_i – потенциально возможная сила тяги в i момент времени, кН.

Рассмотрена гистограмма распределения расчетных значений доли используемой силы тяги (рисунок 2.9).

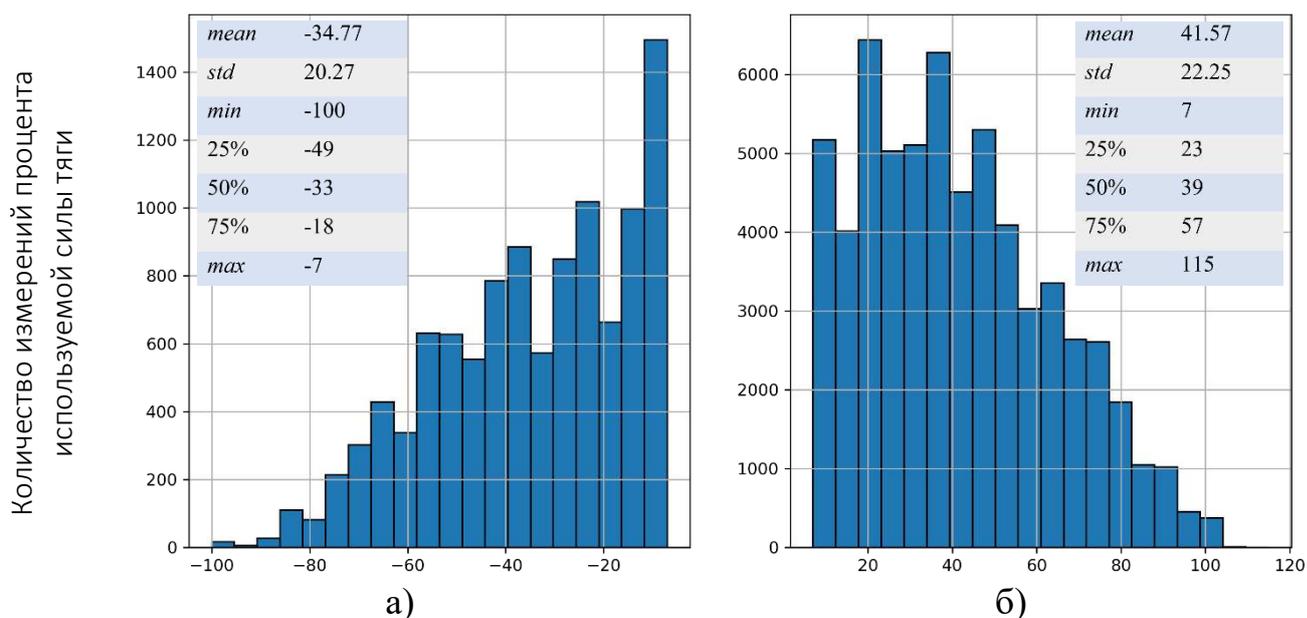


Рисунок 2.9 – Гистограмма распределения процента используемой силы тяги (а – при торможении, б – при разгоне или поддержании скорости)

На рисунке 2.9а представлена гистограмма распределения процента используемой силы тяги при выполнении торможения, в том числе и рекуперативного. На рисунке 2.9б представлена гистограмма распределения процента используемой силы тяги при выполнении разгона и/или при поддержании установленной скорости. Среднее значение использования силы тяги при разгоне и поддержании скорости составляет 41,57%, при стандартном отклонении 22,25%, такое отклонение может быть объяснено влиянием технологической ситуации и человеческого фактора при управлении поездом. Неиспользование силы тяги также может быть объяснено тем, что при увеличении силы тяги увеличивается износ оборудования локомотива, состава, а также верхнего строения пути.

2.4 Регрессионная модель ускорения поездов

Для определения ускорения в зависимости от скорости поезда, силы тяги, уклона и массы построена регрессионная модель вида:

$$A = k_1\theta + k_2V + k_3u_{\text{ПР}} + k_4m_{\text{П}} + \xi, \quad (2.14)$$

где A – зависимая переменная (ускорение поезда), м/с²;

k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты линейной регрессии;

θ – независимая переменная (процент используемой силы тяги), %;

V – независимая переменная (скорость поезда), м/с;

$u_{\text{ПР}}$ – независимая переменная (средневзвешенный по длине поезда уклон), ‰;

$m_{\text{П}}$ – независимая переменная (масса поезда), т;

ξ – константа уравнения регрессии.

Перед вычислением коэффициентов уравнения регрессии, необходимо проверить наличие корреляции между зависимой и независимыми переменными, и убедиться в отсутствии сильной корреляции между независимыми переменными (таблица 2.1). Для вычисления коэффициентов корреляции использованы функции `DataFrame.corr()` библиотеки *Pandas* языка программирования *Python*.

Таблица 2.1 – Коэффициенты корреляции

	V	a	θ	$u_{\text{ПР}}$	$m_{\text{П}}$
V	1	0.068	0.302	0.068	0.041
a	0.006	1	0.229	-0.169	0.012
f_{T}	0.302	0.22	1	0.580	0.193
$i_{\text{ПР}}$	0.068	-0.169	0.580	1	0.036
P	0.041	0.012	0.193	0.036	1

Результаты расчетов (таблица 2.1) показывают низкие значения корреляции переменных, это связано с большой дисперсией выборочных данных. Необходимо

сужать набор исходных данных. Согласно гистограмме распределения массы поездов (рисунок 2.4) выделяются три основные группы: 2800 т, 4400 т и 6300 т. Исходные данные ограничены по величинам средневзвешенных по длине поезда уклонов пути, потому что в данной диссертации исследуются движения поездов в виртуальной сцепке при приеме и отправлении со станции, а согласно [175; 182], железнодорожные станции должны располагаться на участках с уклоном не круче 1,5‰. Дополнительно предлагается разделить модель по признаку разгона и торможения поезда.

Определены коэффициенты корреляции с учетом наложенных ограничений на исходные данные (таблица 2.2). Полученные значения коэффициентов показывают наличие корреляции, при этом отсутствует сильная корреляция независимых переменных.

Таблица 2.2 – Коэффициенты корреляции

	Разгон поезда ($a > 0$)					Торможение поезда ($a < 0$)			
		V	a	θ	$u_{\text{ГР}}$	V	a	θ	$u_{\text{ГР}}$
P=2800Т -4‰ < $u_{\text{ГР}}$ < 4‰	V	1	-0.39	0.1	0.07	1	0.07	0.11	-0.15
	a	-0.39	1	0.36	-0.24	0.07	1	0.68	-0.57
	θ	0.1	0.36	1	0.39	0.11	0.68	1	-0.04
	$u_{\text{ГР}}$	0.07	-0.24	0.39	1	-0.15	-0.57	-0.04	1
P=4400Т -4‰ < $u_{\text{ГР}}$ < 4‰	V	1	-0.15	-0.12	0.03	1	0.37	0.36	0.02
	a	-0.15	1	0.35	-0.46	0.37	1	0.21	-0.5
	θ	-0.12	0.35	1	0.38	0.36	0.21	1	0.47
	$u_{\text{ГР}}$	0.03	-0.46	0.38	1	0.02	-0.5	0.47	1
P=6300Т -4‰ < $u_{\text{ГР}}$ < 4‰	V	1	-0.26	-0.07	-0.04	1	0.19	0.15	-0.15
	a	-0.26	1	0.43	-0.32	0.15	1	0.4	0.5
	θ	-0.07	0.43	1	0.33	-0.15	0.4	1	0.32
	$u_{\text{ГР}}$	-0.04	-0.32	0.33	1	0.03	0.32	0.32	1

Согласно введенным ограничениям на исходные данные, уравнение (2.14) примет вид:

$$A = k_1\theta + k_2V + k_3u_{\text{ГР}} + \xi. \quad (2.15)$$

Для определения коэффициентов уравнения множественной линейной регрессии и проведения статистических тестов использовался метод наименьших квадратов из состава библиотеки *Statmodels* для языка программирования *Python*. Результаты вычисления коэффициентов уравнения регрессии для процесса разгона поезда представлены в таблице 2.3 и для торможения поезда в таблице 2.4

Таблица 2.3 – Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии для процесса разгона поезда

		<i>coef</i>	<i>std err</i>	<i>p-value</i>
$P=2800\Gamma$ $-4\text{‰}<u_{\text{ПР}}<4\text{‰}$ $R^2 = 0.6$	ξ	0.0150	0.001	0.0001
	k_1	0.0008	3.11e-05	0.0001
	k_2	-0.0004	1.89e-05	0.0001
	k_3	-0.0050	1.11e-05	0.0001
$P=4400\Gamma$ $-4\text{‰}<u_{\text{ПР}}<4\text{‰}$ $R^2 = 0.66$	ξ	-0.00520	0.001	0.001
	k_1	0.00050	2.26e-05	0.001
	k_2	-0.00004	1.91e-05	0.0037
	k_3	-0.00650	1.1e-05	0.001
$P=6300\Gamma$ $-4\text{‰}<u_{\text{ПР}}<4\text{‰}$ $R^2 = 0.65$	ξ	0.01040	0.001	0.0001
	k_1	0.00040	7.74e-05	0.0001
	k_2	-0.00020	9.4e-05	0.0001
	k_3	-0.00530	1.1e-05	0.0001

Таблица 2.4 – Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии для процесса торможения поезда

		<i>coef</i>	<i>std err</i>	<i>p-value</i>
$P=2800\Gamma$ $-4\text{‰}<u_{\text{ПР}}<4\text{‰}$ $R^2 = 0.56$	ξ	-0.01750	0.004	0.0001
	k_1	-0.00900	0.001	0.0001
	k_2	0.00090	5.54e-05	0.0001
	k_3	-0.00010	7.19e-05	0.053
$P=4400\Gamma$ $-4\text{‰}<u_{\text{ПР}}<4\text{‰}$ $R^2 = 0.56$	ξ	-0.03170	0.006	0.0001
	k_1	-0.00880	0.001	0.0001
	k_2	0.00040	5.09e-05	0.0001
	k_3	0.00040	1.1e-05	0.0001
$P=6300\Gamma$ $-4\text{‰}<u_{\text{ПР}}<4\text{‰}$ $R^2 = 0.45$	ξ	-0.0101	0.001	0.001
	k_1	-0.0062	0.001	0.001
	k_2	0.0004	1.81e-05	0.001
	k_3	-1.176e-05	5.09e-06	0.06

Полученные коэффициенты детерминации для моделей разгона поезда более 0,6. Это означает, что как минимум 60% изменения зависимой переменной (ускорения) объясняется полученной регрессионной моделью. Величина стандартной ошибки и уровень значимости для коэффициентов уравнения регрессии сообщают о том, что полученные результаты являются статистически значимыми. В тоже время результаты для торможения поезда получились хуже, коэффициент детерминации оставляет 0,45-0,56. Это объясняется тем, что данных для процесса активного торможения гораздо меньше. Поэтому для дальнейшего моделирования движения поездов в виртуальной сцепке будут использованы полученные регрессионные модели только для процесса разгона поездов, для моделирования торможения при приеме на станцию будет использована справочная информация о тормозных путях из таблиц [174].

Полученные регрессионные модели для разгона поездов на плоском профиле пути представлены на рисунках 2.10, 2.11, 2.12.

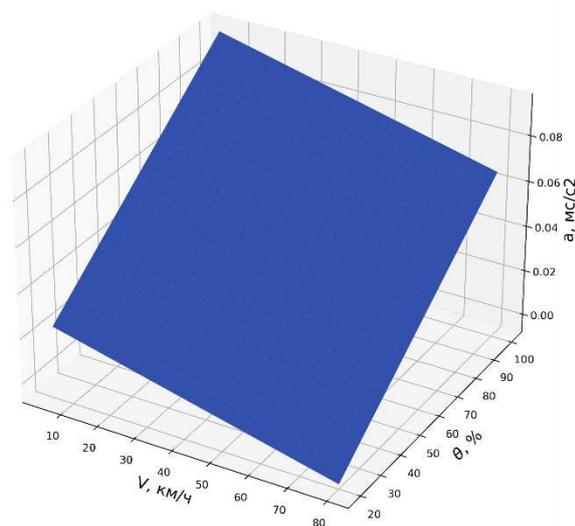


Рисунок 2.10 – Зависимость ускорения разгона поезда от процента используемой силы тяги и текущей скорости поезда (масса поезда 2800 т)

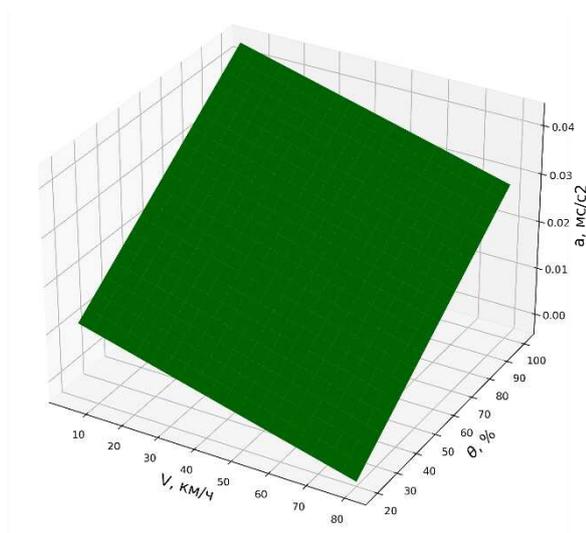


Рисунок 2.11 – Зависимость ускорения разгона поезда от процента используемой силы тяги и текущей скорости поезда (масса поезда 4400 т)

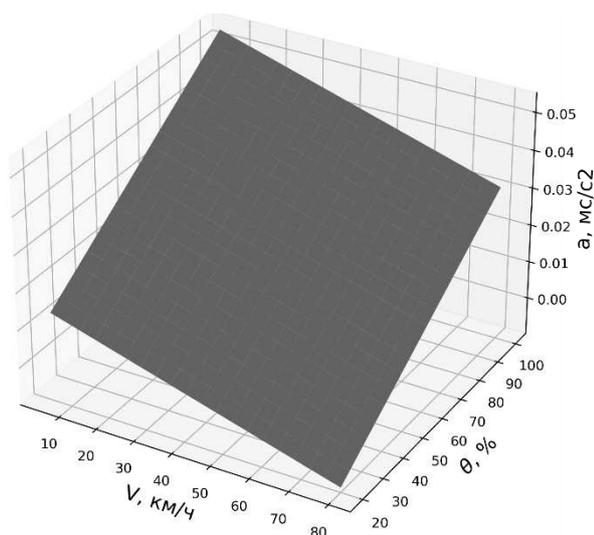


Рисунок 2.12 – Зависимость ускорения разгона поезда от процента используемой силы тяги и текущей скорости поезда (масса поезда 6300 т)

Полученные графики (рисунок 2.10, 2.11, 2.12) демонстрируют прямую пропорциональность между ускорением и процентом используемой силы тяги и обратную пропорциональность ускорения к скорости. В зависимости от массы поезда можно оценить изменение значений ускорения, чем выше масса, тем меньше значения ускорений.

2.5 Методика моделирования движения поездов

По результатам проведенных исследований зависимостей ускорения от скорости и силы тяги можно сформулировать методику моделирования движения поездов в виртуальной сцепке по значениям ускорений.

Для моделирования разгона грузовых поездов до установленной скорости по профилю пути от минус 4 до 4 ‰:

1. Необходимо определить массу поезда, его длину, процент использования силы тяги в процессе движения.
2. По массе поезда выбрать соответствующую регрессионную модель (таблица 2.3).
3. Определить шаг интегрирования.
4. Вычислить ускорение, скорость и пройденный путь по следующим выражениям для головы поезда:

$$a_i = k_1 \theta_{i-1} + k_2 V_{i-1} + k_3 u_{\text{ПР}i-1} + \xi, \quad (2.16)$$

$$V_i = V_{i-1} + a_i \Delta t, \quad (2.17)$$

$$S_i = S_{i-1} + \left(\frac{V_i + V_{i-1}}{2} \right) \Delta t. \quad (2.18)$$

Для моделирования торможения грузовых поездов:

1. Необходимо определить начальную и конечные скорости поезда, уклон пути, тормозной коэффициент поезда, шаг интегрирования.
2. По тормозному коэффициенту и уклону из тормозных таблиц выбрать соответствующую тормозную кривую.
3. Интерполировать промежуточные значения скоростей и тормозных путей, указанных в таблицах.
4. Вычислить пройденный путь за время подготовки к срабатыванию тормозов (время распространения тормозной волны 4 с и времени реакции системы и

машиниста 4 с), вычесть соответствующее значение подготовительного тормозного пути из соответствующего табличного значения тормозного пути.

5. Вычислить ускорения торможения, соответствующие каждому значению скорости:

$$a_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{S_{\text{ТП}i} - S_{\text{ТП}i-1}}, \quad (2.19)$$

где $S_{\text{ТП}i}$ – тормозной путь для i значения скорости;

$S_{\text{ТП}i-1}$ – тормозной путь для $i-1$ значения скорости.

6. Воспользоваться формулами (2.17) и (2.18) для вычисления скорости и пройденного пути поезда по ускорениям, полученным в результате вычислений по (2.19).

Программный код, написанный на языке Python для выполнения описанных расчетов, представлен в приложении А.

2.6 Верификация регрессионной модели ускорения поезда

Для оценки адекватности регрессионной модели помимо представленных в п. 2.4 стандартных ошибок и уровней значимости коэффициентов уравнения регрессии, проведено показательное моделирование и рассмотрено поведение остатков пройденного пути и скорости. Для этого построены кривые скоростей поездов при разгоне и торможении с помощью уравнений регрессии в п. 2.4 и проведено сравнение с фактическими, в тех же условиях (рисунки 2.13, 2.14).

На рисунке 2.13 представлены кривые скорости движения поездов массы 4400 т при разгоне после трогания со станции. Также на графике (рисунок 2.13) нанесены линии обозначающие значения средневзвешенного по длине поезда уклона пути, и пунктирная линия описывающий текущий режим работы локомотива (получена из дискретных сигналов РПМ).

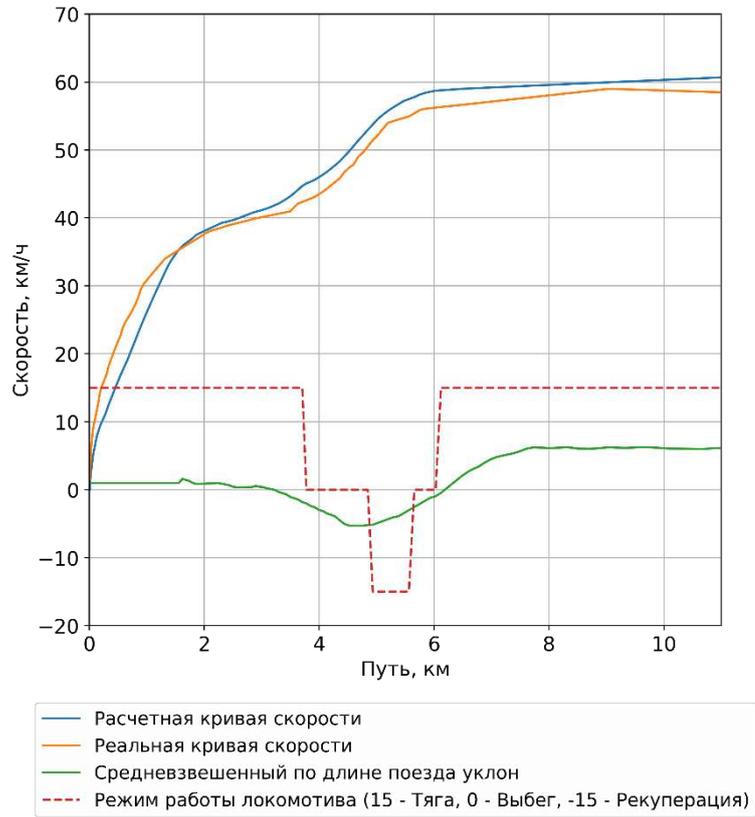


Рисунок 2.13 – Кривые скорости расчетного и реального поезда при отправлении со станции

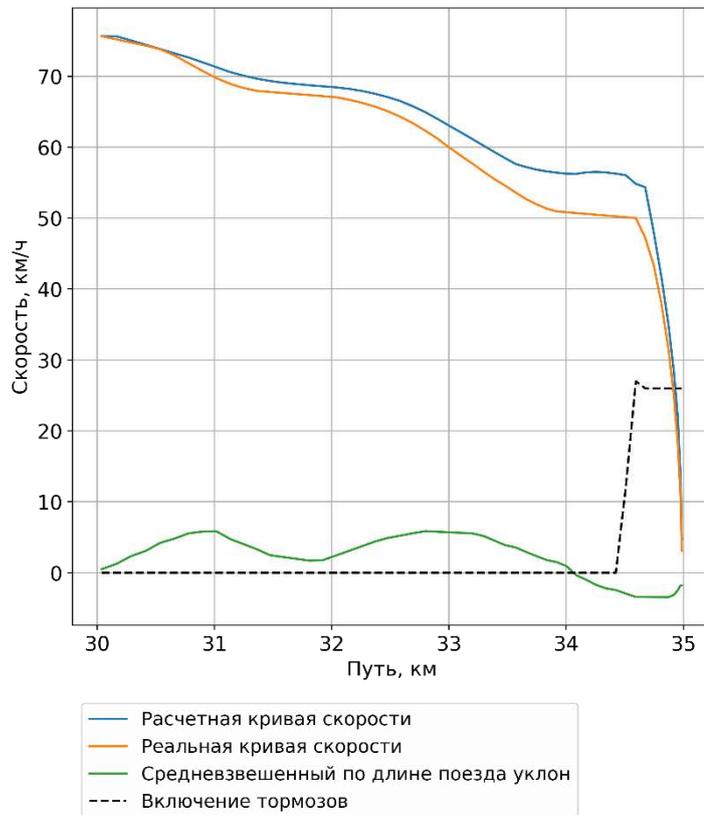


Рисунок 2.14 – Кривые скорости расчетного и реального поездов при остановке

На рисунке 2.14 представлены кривые скорости расчетного и реального поезда массой 4400 т при остановке накатом и при активном торможении, дополнительно нанесена кривая обозначающая средневзвешенный по длине поезда уклон пути и пунктирная линия дискретного сигнала обозначающего появление давления в тормозных цилиндрах.

Для того, чтобы выполнить численную оценку проведенного моделирования рассчитано среднее значение (2.20), дисперсию (2.21) и стандартное отклонение остатков (2.22):

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \hat{x}_i}{n}, \quad (2.20)$$

где M – среднее значение отклонения теоретического значения от фактического;

x_i – фактическое значение величины;

\hat{x}_i – теоретическое значение величины;

n – количество промоделированных значений.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n - 1}, \quad (2.21)$$

где D – дисперсия остатков.

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (2.22)$$

где σ – стандартное отклонение остатков.

Результаты вычислений по формулам (2.20-2.22) сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов статистических показателей остатков

	Разгон поездов		Торможение поездов	
	Скорость, км/ч	Пройденный путь, м	Скорость, км/ч	Пройденный путь, м
Среднее значение остатков	-0.01	-193	0.96	88
Дисперсия остатков	8.17	49444	4.21	5048
Стандартное отклонение остатков	2.85	222.3	2.05	71

С учетом 95% доверительного интервала среднее значение отклонения скорости при разгоне поездов составляет минус $0,01 \pm 5,7$ км/ч, отклонение пройденного пути минус 193 ± 223 м. При торможении поездов отклонение скорости составляет $0,96 \pm 4,10$ км/ч, отклонение пройденного пути 88 ± 140 м. Полученные значения отклонений являются допустимыми для моделирования движения поездов в виртуальной сцепке.

Выводы по 2 главе

Результаты исследований во 2 главе диссертации:

1. Проведен анализ способов моделирования движения поездов, приведены преимущества и недостатки основных способов моделирования – тяговых расчетов и имитационного моделирования. Обоснована необходимость разработки методики моделирования движения поезда с использованием данных о движении поездов из локомотивных систем.
2. Выполнен анализ данных о поездках поездов, с целью определить диапазоны изменения ускорений реальных поездов. Приведены гистограммы распределения и описательная статистика.
3. Построена модель множественной линейной регрессии для ускорений поездов при разгоне и торможении. Результаты модели для разгона поезда позволяют сделать выводы о статистической значимости полученных зависимостей.
4. Разработана методика моделирования движения поездов при разгоне на основании представленной регрессионной модели и при торможении на основании вычисленных ускорений по справочным таблицам тормозных путей.

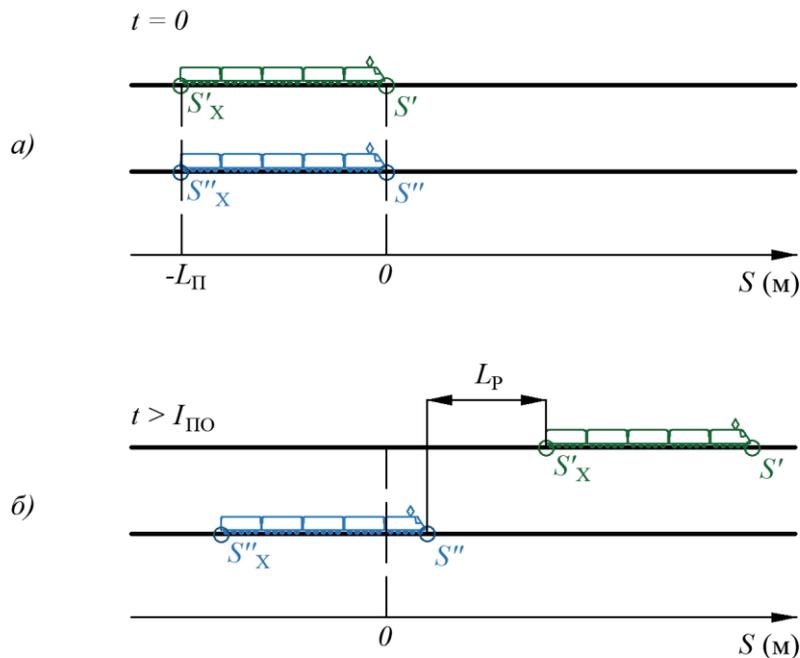
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ

3.1 Моделирование отправления поездов в виртуальной сцепке

3.1.1 Моделирование движения по параллельным путям

Рассмотрим процесс набора максимальной скорости поездами, двигающимися по параллельным путям, для исключения влияния условий безопасности (рисунок 3.1).

На рисунке 3.1а представлены два поезда длиной L_{Π} , головы этих поездов расположены на нулевой ординате. После отправления первого (ведущего) поезда происходит выдержка времени равная интервалу попутного отправления, после чего трогается второй (ведомый) поезд (рисунок 3.1б).



Условные обозначения:

S' (S'') - координата головы ведущего (ведомого) поезда

S'_x (S''_x) - координата хвоста ведущего (ведомого) поезда

L_{Π} - длина поезда

$I_{\text{ПЮ}}$ - интервал попутного отправления

Рисунок 3.1 – Расстояние между поездами при движении по параллельным путям
(а – исходная позиция, б – после трогания ведомого поезда)

Под расстоянием между поездами понимается разница между координатой хвоста ведущего поезда и головой ведомого поезда в проекции на ось пройденного пути:

$$L_p(t) = S'_x(t) - S''(t - I_{\text{ПО}}) \quad (3.1)$$

где, L_p – расстояние между поездами, м;

S'_x – координата хвоста ведущего поезда, м;

S'' – координата головы ведомого поезда, м;

$I_{\text{ПО}}$ – интервал попутного отправления ведомого поезда, с.

Для вычисления расстояния между поездами раскрыто выражение (3.1) с помощью выражений (2.6) и (2.9):

$$\begin{aligned} L_{pi} &= S'_{xi} - S''_j, \\ S'_{xi} &= S'_{xi-1} + \frac{V'_i - V'_{i-1}}{2} \Delta t - L_{\Pi}, \\ S''_j &= S''_{j-1} + \frac{V''_j - V''_{j-1}}{2} \Delta t, \\ V'_i &= V'_{i-1} + a'_i \Delta t, \\ V''_j &= V''_{j-1} + a''_j \Delta t, \end{aligned} \quad (3.2)$$

при $j = i - I_{\text{ПО}} \geq 0$, $\Delta t = 1$ сек, $S'_{x0} = -L_{\Pi}$, $S''_0 = 0$, $V'_0 = 0$, $V''_0 = 0$.

где, i – номер шага интегрирования при вычислении координаты хвоста ведущего поезда;

j – номер шага интегрирования при вычислении координаты головы ведомого поезда.

Выполнены расчеты по выражению (3.2), с целью изучения изменения расстояния между поездами с одинаковым средним ускорением разгона, в широком диапазоне интервалов попутного отправления (рисунок 3.2).

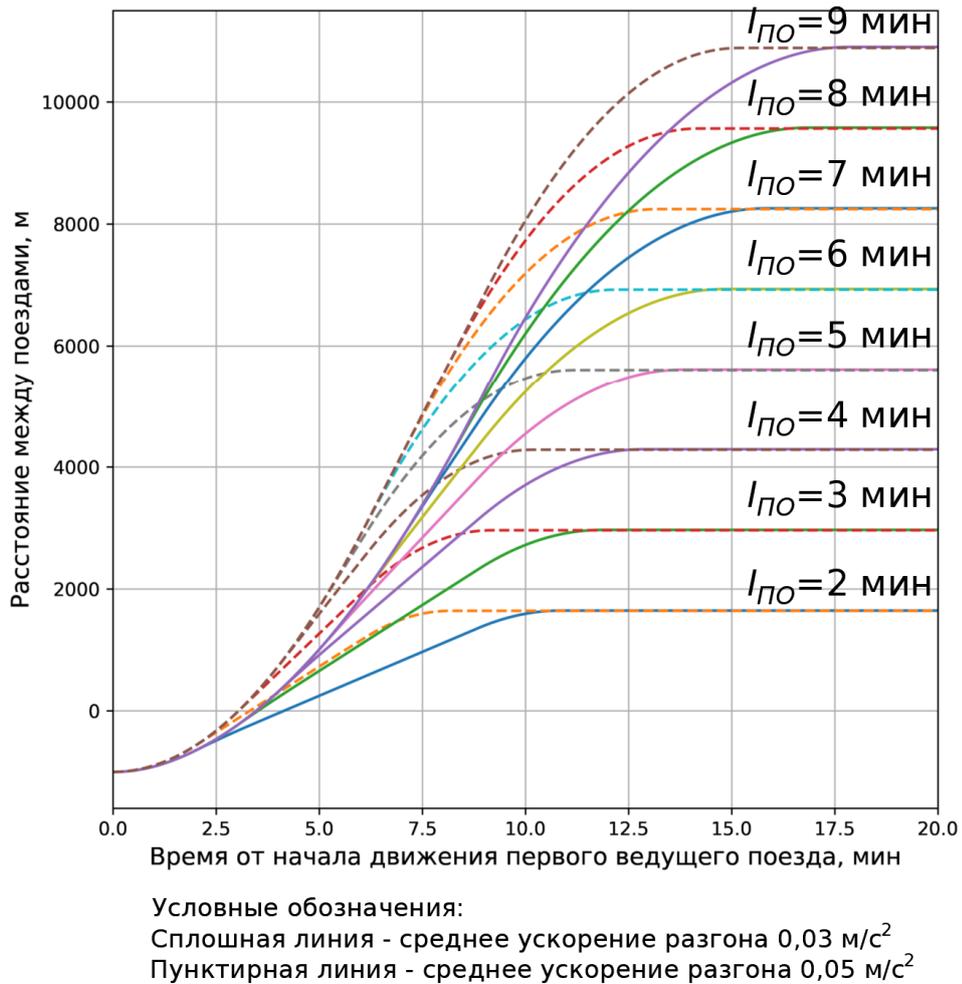


Рисунок 3.2 – График зависимости расстояния между ведущим и ведомым поездами при разном интервале попутного отправления ведомого поезда

На рисунке 3.2 представлены графики изменения расстояния между головой ведомого и хвостом ведущего поезда (при движении поездов по параллельным путям), при одинаковом среднем ускорении разгона этих поездов равным $0,03 \text{ м/с}^2$ (сплошные линии на рисунке 3.2), $0,05 \text{ м/с}^2$ (пунктирные линии на рисунке 3.2) и разных (от 1 мин до 9 мин) интервалах попутного отправления ведомого поезда. На графиках расстояние между поездами имеет отрицательные значения, это означает что хвост ведущего поезда еще не проследовал голову ведомого поезда. При этом, чем меньше интервал попутного отправления, тем дольше будет сохраняться отрицательное значение расстояния между поездами, это связано с тем, что поезда начинают двигаться в момент времени, когда разница скоростей поездов недостаточна для того, чтобы хвост ведущего поезда обогнал голову ведомого поезда. После

того, как расстояние между поездами становится положительным, график изменения является линейным (оба поезда набирают скорость). В момент выхода ведущего поезда на максимальную скорость график принимает параболическую форму (движение близко к равноускоренному). После того как ведомый выходит на движение с максимальной скоростью, расстояние между поездами перестает меняться. Ускорение поезда влияет на скорость изменения расстояния между поездами и не влияет на итоговое расстояние между поездами при движении их на максимальной скорости (сплошные и пунктирные линии для соответствующих значений интервала попутного отправления сходятся).

Таким образом, изменяя только интервал попутного отправления, можно добиваться разного расстояния между поездами на перегоне, а изменение только ускорения влияет на время выхода поездов на движение с заданным расстоянием.

3.1.2 Влияние ограничений скорости на станции на процесс отправления поездов

Рассмотренная выше модель движения поездов по параллельным путям не учитывала влияние возможных ограничений скорости в горловине станции. Для поездов, отправляющихся в виртуальной сцепке со станции с уменьшенным интервалом (относительно расчетного интервала попутного отправления при трехблочном разграничении движения поездов), особенно важно выполнить оценку влияния возможных ограничений скорости на станции для ведомого поезда. В случае разгона ведомого поезда в горловине станции с ограничением скорости $V_{ог}$ длиной $L_{ог}$ возможны следующие ситуации:

- ведомый поезд не успевает разогнаться до $V_{ог}$, продолжая плавно набирать скорость до достижения ограничения по максимальной разрешенной скорости;
- ведомый поезд успевает разогнаться до $V_{ог}$, тогда необходимо будет двигаться равномерно пока хвост поезда не освободит участок с ограничением скоро-

сти, за это время ведущий поезд, в случае отсутствия ограничений на пути его отправления, может удалиться настолько, что будет нарушен заданный межпоездной интервал.

При моделировании процесса разгона по значениям ускорений, можно определить максимальное значение среднего ускорения разгона, при котором поезд не успеет разогнаться до скорости ограничения (рисунок 3.3).

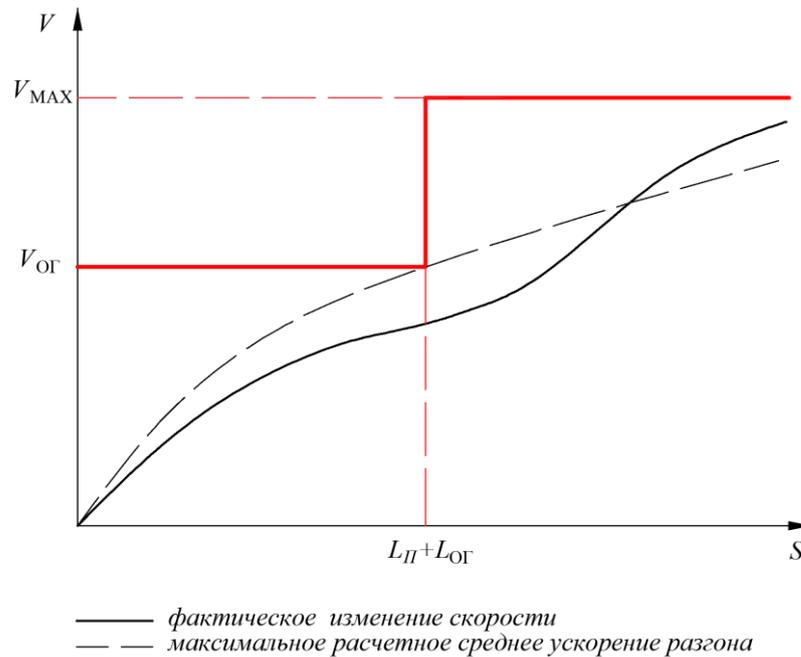


Рисунок 3.3 – Кривая скорости поезда при отпавлении

Зная длину участка ограничения и разрешенную скорость на данном участке, можно определить ускорение, при котором поезд будет набирать скорость под ограничивающими значениями:

$$a_{cp}^{max} = \frac{V_{ог}^2}{2(L_{п} + L_{ог})}, \quad (3.3)$$

где a_{cp}^{max} – максимально допустимое среднее ускорение поезда, m/c^2 ;

$V_{ог}$ – ограничение скорости, m/c

$L_{ог}$ – длина участка с ограничением скорости, m .

По выражению (3.3) выполнены расчеты для широкого диапазона значений $V_{ог}$ и $L_{ог}$, при длине поезда 1000 м, график полученных зависимостей представлен на рисунке 3.4.

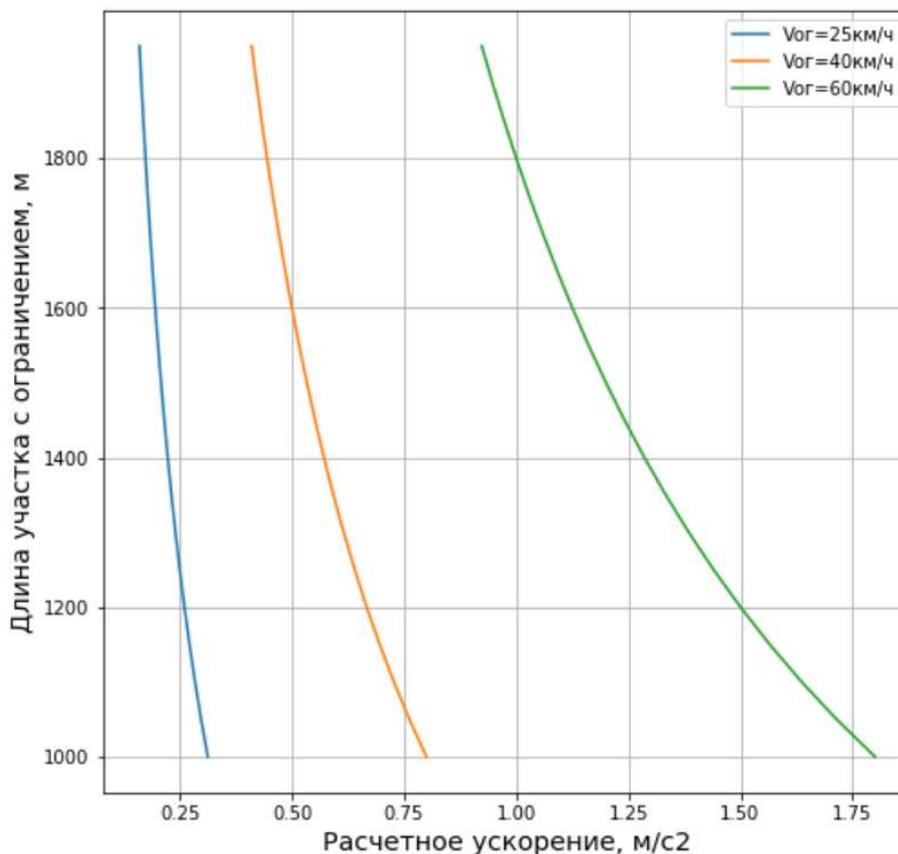


Рисунок 3.4 – Расчетные значения средних ускорений, необходимых для исключения влияния участка с ограничением скорости

По полученным графикам видно, что при ограничении скорости, например, в 40 км/ч (отсутствие кодирования с бокового пути или крутая стрелка на выходе со станции) существует диапазон ускорений при разных длинах участка с ограничением, позволяющий осуществить равномерный разгон поезда. С помощью предложенного метода расчета, можно оценить необходимость снятия существующих ограничений скоростей в горловинах станций при отправлении поездов в виртуальной сцепке или искусственного ограничения ускорения, развиваемого локомотивами, с целью сохранения постоянного расстояния (или временного интервала) между поездами в ВСЦ.

Выше был рассмотрен процесс разгона поездов при отправлении со станции по параллельным путям, дана оценка среднего ускорения, при котором ведомый поезд будет разгоняться плавно без ограничения по скорости. Упрощение, связанное с движением поездов по параллельным путям, позволяет не учитывать требования, связанные с условиями безопасности движения. Следующим этапом становится моделирование отправления поездов в ВСЦ со станции по одному пути.

3.1.3 Моделирование отправления поездов по одному пути

Рассмотрен процесс отправления поездов по желтому показанию выходного светофора со станции имеющей горловину длиной 500 м, первый участок удаления длиной 1500 м и второй участок удаления длиной 2000 м (рисунок 3.5).

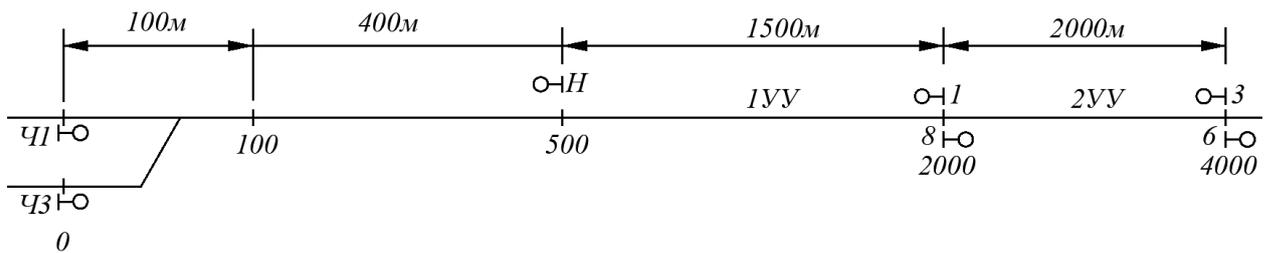


Рисунок 3.5 – Схема рассматриваемой станции и участков удаления

На рисунке 3.5 представлена схема станции с короткой горловиной (менее 1500 м), в таком случае невозможна установка первого проходного светофора на одной ординате со входным светофором встречного направления, по причине невыполнения требования по обеспечению тормозных путей. Построены графики изменения координаты головы поезда во времени (рисунок 3.6) при среднем ускорении разгона поездов $0,03 \text{ м/с}^2$.

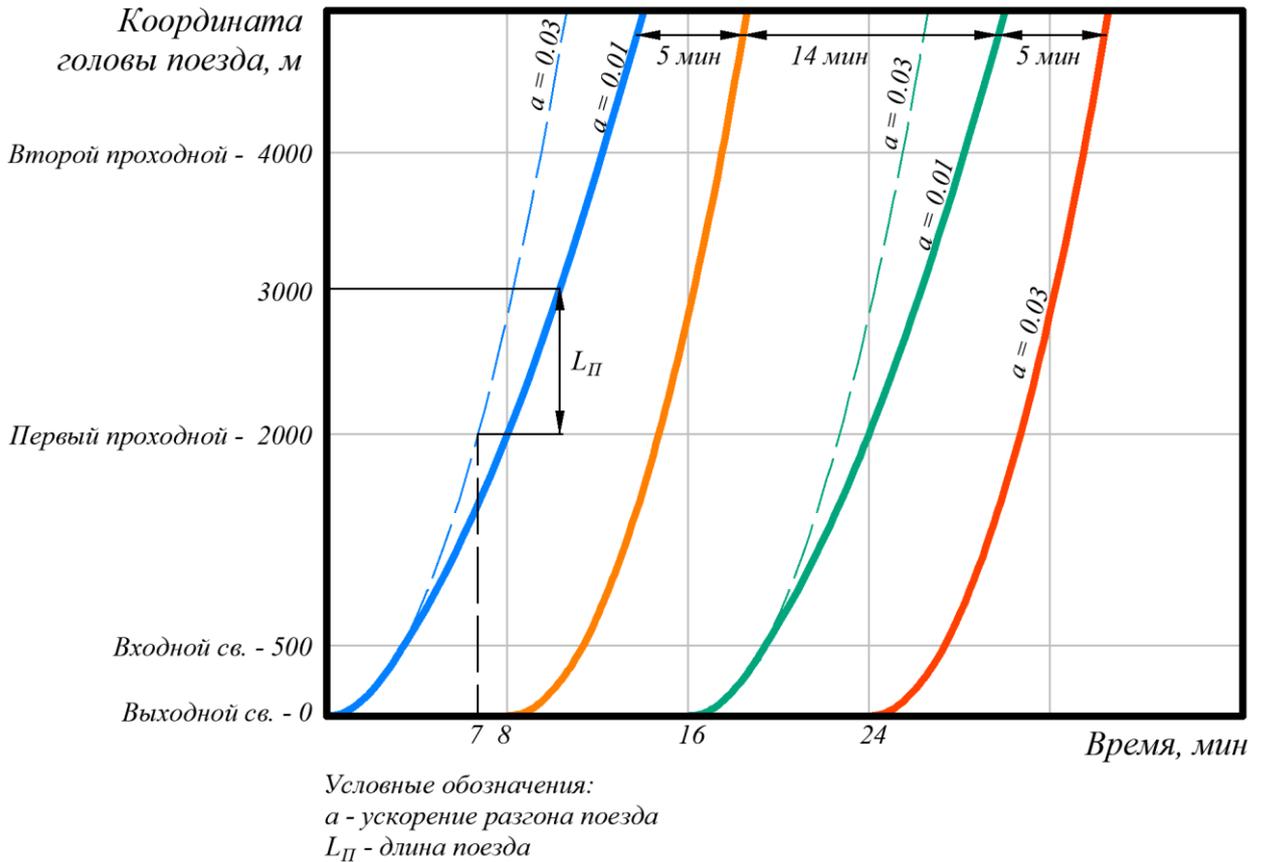


Рисунок 3.6 – График изменения координаты головы поездов отправляющихся со станции

Первый поезд (синяя линия на рисунке 3.6) отправляется по зеленому сигналу выходного светофора. Открытие выходного светофора на желтый сигнал для последующего поезда возможно только после проезда хвоста первого поезда за первый проходной светофор, это происходит через 7 мин после трогания первого. Получается, что при среднем ускорении $0,03 \text{ м/с}^2$ на рассматриваемой станции, минимальный интервал попутного отправления составляет 7 мин. Применение технологии виртуальной сцепки для рассмотренных поездов позволит уменьшить расстояние между поездами до расстояния двухблочного разграничения. Но для этого потребуется ограничить ускорение ведущего поезд таким образом, чтобы при отправлении ведомого поезда без ограничения по ускорению он выходил на движение с двухблочным разграничением и интервалом в пакете равным 5 мин (вместо 7 мин при отсутствии ограничения ускорения ведущего поезда). При этом ограниче-

ние ускорения приводит к увеличению интервала попутного отправления, поскольку скорость освобождения хвостом первого участка удаления станет меньше. На рисунке 3.6 видно, что замедление ведущего поезда для обеспечения движения с двухблочным разграничением приводит к тому, что интервал попутного отправления ведомого поезда становится равным 8-ми минутам. Отправление третьего поезда (зеленая линия на рисунке 3.6), как ведущего поезда виртуальной сцепки, с уменьшенным ускорением, приводит к тому, что интервал в пакете между вторым и третьим поездом становится равным 14-ти минутам. Получается, что уменьшение ускорения ведущего поезда приводит к сближению только ведущего и ведомого поезда виртуальной сцепки, и не может оказать значительного влияния на пропускную способность участка в целом. Данный способ сближения поездов может найти ограниченное применение при восстановлении графика движения после закрытия перегона, когда будет накоплено большое количество поездов, а технология виртуальной сцепки будет позволять одному ведущему поезду осуществлять безостановочную сцепку с несколькими ведомыми поездами.

Для обеспечения двухблочного разграничения всех поездов в пакете без ограничений по ускорению ведущих поездов необходимо сократить интервал попутного отправления настолько, чтобы он был равен интервалу в пакете при двухблочном разграничении поездов пакета (5 мин в рассматриваемом примере). То есть возникает необходимость сокращения расстояния между поездами в момент отправления со станции. Поскольку при движении поездов необходимо обеспечить их разграничение хотя бы одним изолированным участком, ограниченным светофорами, сокращение расстояния между поездами при отправлении, приводит к появлению новых (дополнительных) светофоров.

Построим графики зависимости координаты головы поезда при попутном отправлении поездов с интервалом 5 мин (рисунок 3.7).

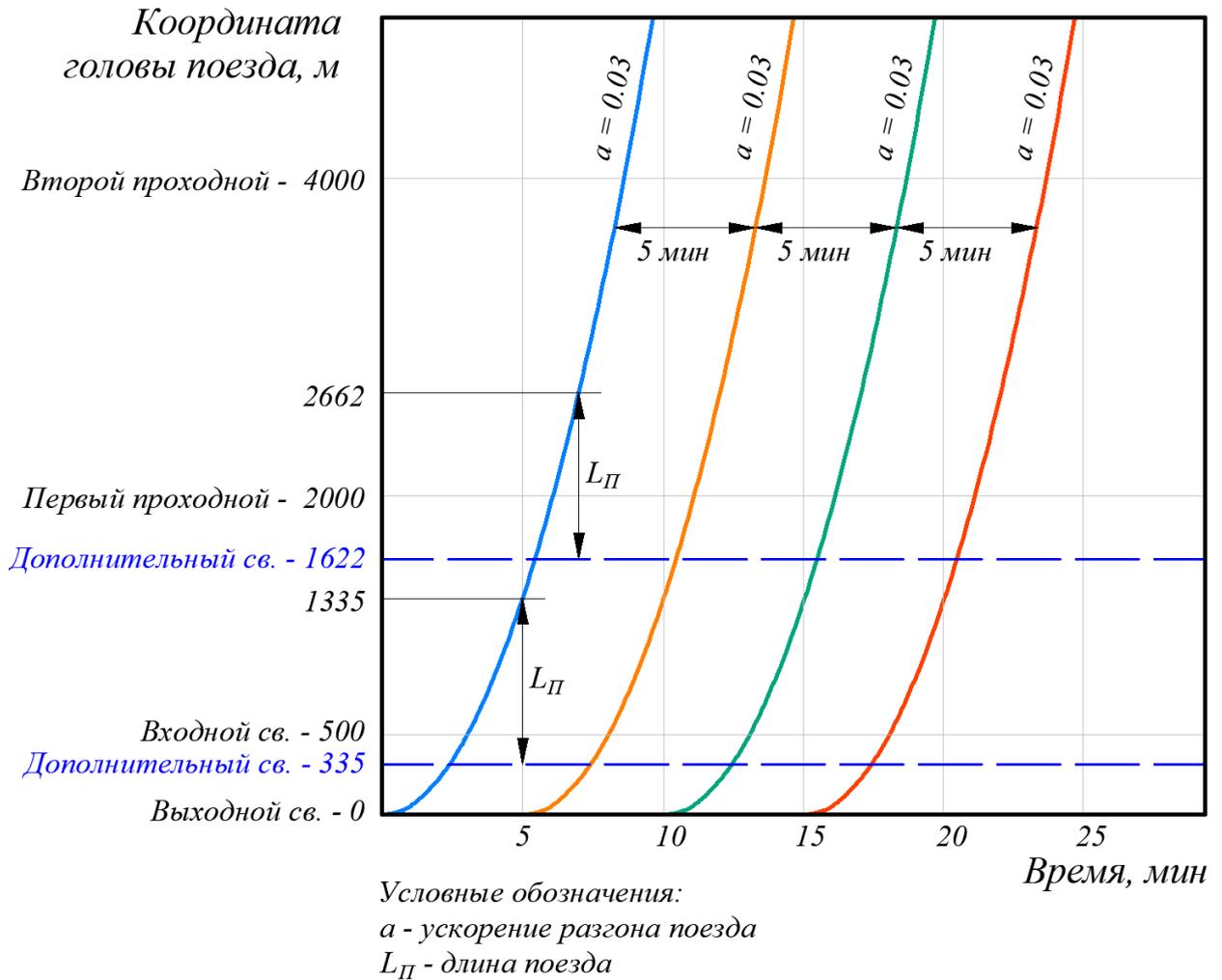


Рисунок 3.7 – График изменения координаты головы поездов отправляющихся со станции

На рисунке 3.7 представлены графики при отправлении поездов виртуальной сцепки с ускорением разгона $0,03 \text{ м/с}^2$ и интервалом попутного отправления 5 мин. Первый поезд отправляется без ограничений по зеленому показанию выходного светофора. Второй (ведомый) поезд необходимо отправить с интервалом 5 мин, для этого первый поезд должен полностью уехать за границу установки дополнительного светофора, расположенного на расстоянии 335 м. В таком случае отправление ведомого поезда происходит по желтому сигналу выходного светофора на красный сигнал дополнительного светофора. Безопасная реализация такого отправления без выдержки расстояния 1500 м до первого проходного светофора (заданного по тор-

возможным путям грузовых и пассажирских поездов с максимальных скоростей) возможна потому, что поезда трогаются со станции и не успевают набирать максимальную скорость, а локомотивные устройства виртуальной сцепки контролируют продолжающийся разгон ведущего поезда и позволяют разогнаться на красный под кривой допустимой скорости (рисунок 3.8а). Благодаря тому, что поезда продолжают набор скорости, в момент подхода головы второго поезда к дополнительному светофору (рисунок 3.8б), хвост первого поезда будет находиться в конце второго участка удаления, и расстояние между поездами будет значительно превышать тормозной путь ведомого поезда. В случае правильной расстановки дополнительных светофоров и соблюдении равенства ускорений, дополнительные светофоры будут своевременно переключаться на разрешающие показания (рисунок 3.8в), позволяя осуществить плавный разгон поездов под кривой разрешенной скорости с наиболее быстрым выходом поездов на режим движения двухблочным разграничением. В рассматриваемом примере (рисунок 3.7) установка двух дополнительных светофоров, одного в границах станции (на расстоянии 335 м от выходного светофора) и одного на первом участке удаления (на расстоянии 1622 м от выходного светофора) позволяет реализовать отправление поездов с 5 мин интервалом попутного отправления и движение с 5 мин интервалом в пакете при двухблочном разграничении.

Рассмотренный пример демонстрирует необходимость применения дополнительных устройств автоматики, для сокращения интервала попутного отправления поездов виртуальной сцепки. Сохранение безопасности при описанном отправлении возможно благодаря локомотивным системам безопасности и автоведения виртуальной сцепки, учитывающей движение ведущего поезда при построении кривой разрешенной скорости. В случае отказа систем виртуальной сцепки, и красном показании дополнительного светофора, к которому приближается ведомый поезд, расстояния до светофора должно быть достаточно для выполнения прицельного торможения к светофору, средствами системы автоматического управления торможением (САУТ, БЛОК, и т.п.).

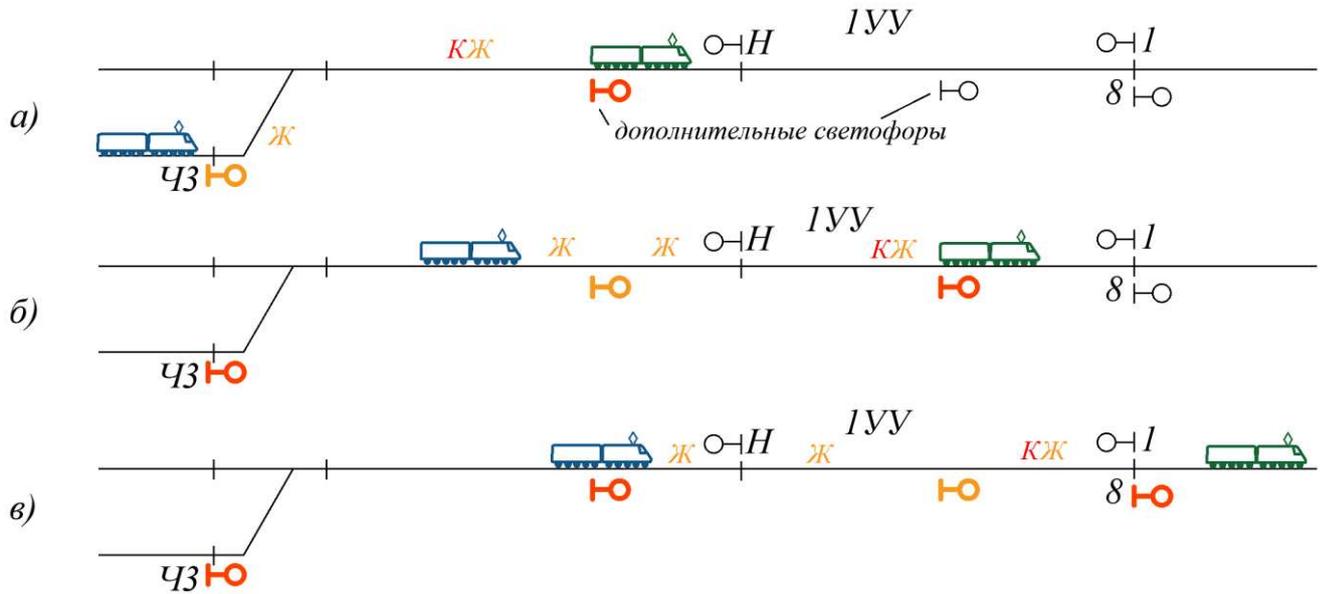


Рисунок 3.8 – Отправление поездов виртуальной сцепки «под желтый на красный» (а – отправление ведомого на код Ж, б – ведомый подъезжает к дополнительному светофору, в – ведомый пересекает дополнительный светофор с сохранением кода Ж)

При этом нельзя исключать одновременного отказа систем автоведения виртуальной сцепки и САУТ, в таком случае безопасность движения должна быть обеспечена срабатыванием автостопа (при превышении скорости движения) при вступлении на участок пути перед дополнительным светофором ЧЗ-5Д кодируемый кодом «КЖ» (рисунок 3.9).

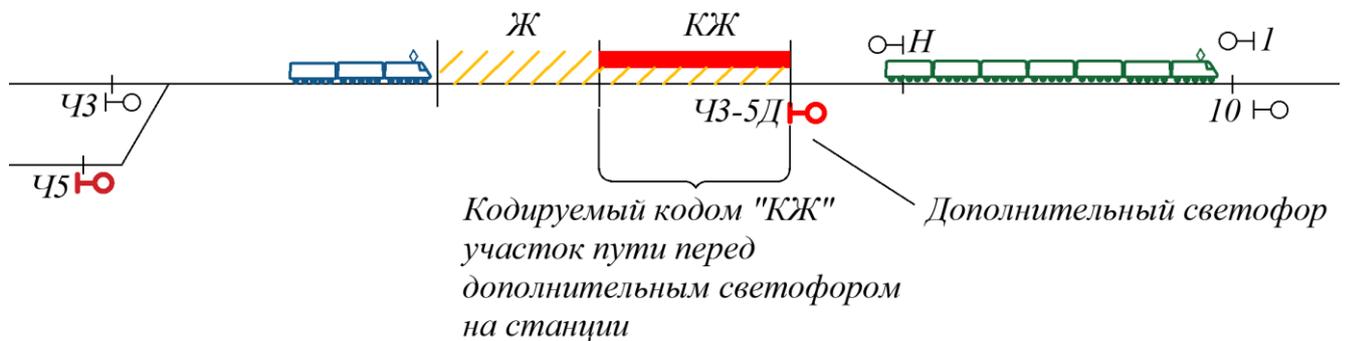


Рисунок 3.9 – Приближение ведомого поезда к дополнительному светофору в горловине станции

3.1.4 Концепция применения технологии виртуальной сцепки при попутном отправлении

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы о применении технологии виртуальной сцепки для повышения пропускной способности участка железных дорог:

1. Повышение пропускной способности достигается за счет перехода на движение с двухблочным разграничением попутных поездов (движение под зеленый на желтый). Для этого необходимо обеспечить плавный разгон поездов при трогании со станции с выходом на движение с двухблочным разграничением.

2. Требуется уменьшение интервала попутного отправления до значения, определяемого межпоездным интервалом при движении поездов с двухблочным разграничением (движение под зеленый на желтый).

3. Уменьшение интервала попутного отправления приводит к тому, что расстояние между поездами при разгоне после трогания со станции меньше, чем предполагалось по существующим нормам безопасности движения и правилам проектирования станционных и перегонных систем автоматики.

4. Необходимо доработать существующие системы автоматики таким образом, чтобы они позволяли отправлять поезда в виртуальной сцепке с интервалом попутного отправления меньшим, чем расчетный при трехблочном разграничении поездов, а также дополнительно контролировали безопасность пока поезд не выйдет на движение с двухблочным разграничением к концу заданного участка пути (например, к концу второго участка удаления).

5. Для обеспечения безопасности требуется установка дополнительных светофоров, количество и места установки которых должны определяться расчетом для конкретной станции.

6. Для обеспечения защиты от сбоя и отказов систем виртуальной сцепки, необходимо предусмотреть кодирование секций маршрута отправления ведомого поезда по принципу подвижных блок-участков.

7. Дополнительные светофоры, устанавливаемые для отправления поездов в виртуальной сцепке, не должны оказывать влияния на поезда, проходящие станцию без остановок, и на поезда, не использующие технологию виртуальной сцепки.

8. После того, как расстояние между поездами стало таким, что между ними располагается два свободных блок-участка (поезда вышли на движение с двухблочным разграничением), дальнейшее движение должно осуществляться по показаниям существующих систем интервального регулирования.

Следующим этапом моделирования становится определение такого набора условий, при котором становится возможным отправление поездов в виртуальной сцепке с выходом их на двухблочное разграничение к концу заданного участка пути.

3.1.5 Определение граничных условий при попутном отправлении поездов в виртуальной сцепке

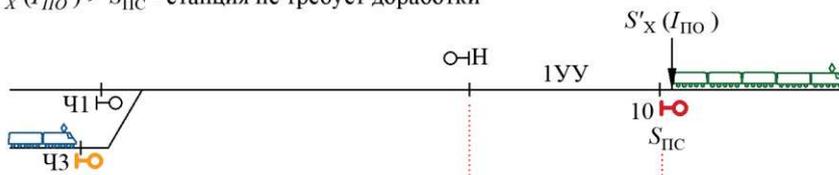
Перед моделированием необходимо провести первоначальную проверку, нуждается ли станция и подвижной состав в изменениях для обеспечения заданного интервала попутного отправления:

– если координата хвоста ведущего поезда, при заданном интервале и ускорении, будет находиться за первым проходным светофором, то на данной станции можно осуществить отправление «под желтый на красный» без каких-либо изменений систем автоматики (рисунок 3.10а);

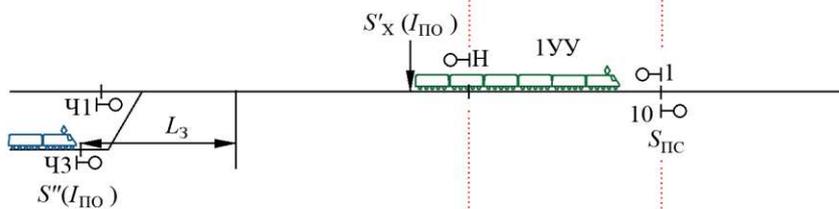
– если координата хвоста ведущего поезда, в момент отправления ведомого, оказалась меньше ординаты первого проходного светофора, но больше координаты головы ведомого поезда (с учетом расчетного защитного участка), то значит необходимо совершенствовать системы автоматики, либо увеличивать ускорение поездов (рисунок 3.10б);

– если координата хвоста ведущего поезда, в момент отправления ведомого, оказалась меньше координаты головы ведомого поезда, с учетом расчетного защитного участка L_3 , значит для ведомого поезда необходимо осуществлять отправление параллельно ведущему, по разгонному пути (рисунок 3.10в).

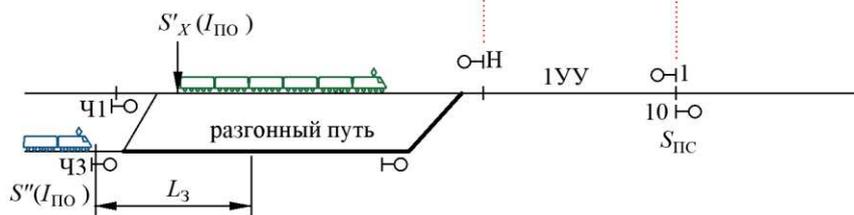
а) $S'_x(I_{по}) > S_{пс}$ - станция не требует доработки



б) $S''(I_{по}) + L_3 < S'_x(I_{по}) < S_{пс}$ - требуется совершенствование систем автоматики



в) $S'_x(I_{по}) < S''(I_{по}) + L_3$ - требуется разгонный путь для ведомого поезда



Обозначения:

$S'_x(I_{по})$ – координата хвоста ведущего поезда в момент времени $t = I_{по}$;

$S_{пс}$ – ордината первого проходного светофора;

$S''(I_{по})$ – координата головы ведомого поезда в момент времени $t = I_{по}$;

L_3 – расчетный защитный участок пути;

$1УУ$ – первый участок удаления.

Рисунок 3.10 – Проверка возможности станции выполнить заданный интервал попутного отправления

На рисунке 3.11 представлены результаты проверки условной станции на возможность отправления с заданным интервалом попутного отправления в зависимости от процента используемой силы тяги электровоза поездов массой 2800 и 6300 т.

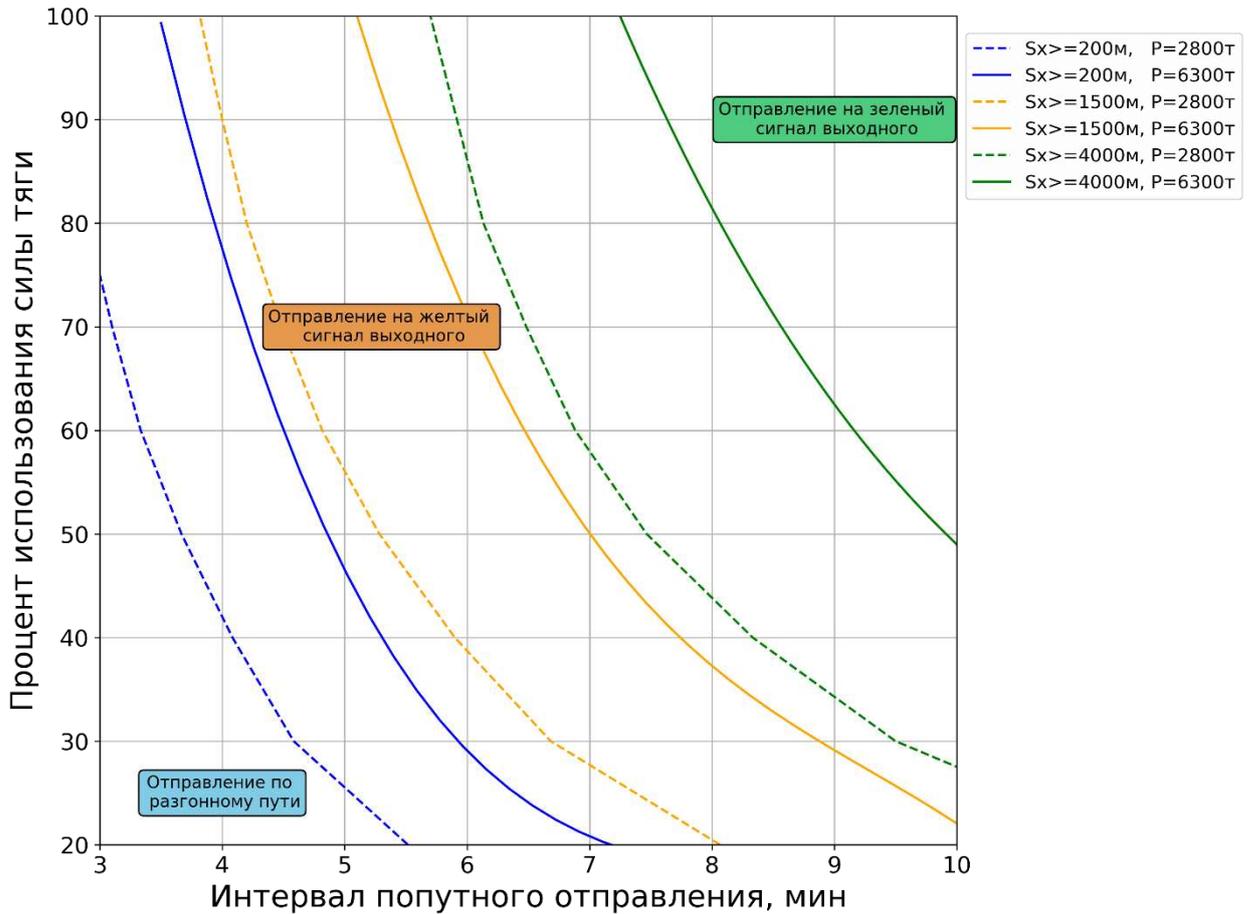


Рисунок 3.11 – Результат моделирования проверки станции на возможность выполнения заданного интервала попутного отправления

При моделировании принято расстояние от выходного светофора до первого проходного – 1500 м, а до второго проходного светофора 4000 м. Так в случае, если хвост ведущего поезда оказывается за первым проходным светофором, это означает, что ведомый поезд может отправляться по желтому показанию выходного светофора (желтая сплошная и желтая пунктирная линия на рисунке 3.11) без изменения существующих регламентов и технических решений систем автоматики.

Если хвост ведущего поезда успевает проследовать за второй проходной сигнал, значит ведомый может отправляться по зеленому показанию выходного светофора (зеленая сплошная и зеленая пунктирная линия на рисунке 3.11). Нелинейность графиков объясняется тем, что поезда набирают скорость и двигаются ускоренно.

По графику (рисунок 3.11) можно оценить сокращение интервала попутного отправления при переходе от отправления на зеленый сигнал выходного светофора, к отправлению на желтый сигнал или к отправлению по разгонному пути. При использовании 80% силы тяги, для поезда массой 6300 т, и переходе к отправлению на желтый сигнал, на моделируемом участке можно уменьшить интервал попутного отправления на 2,2 мин. Дальнейшее уменьшение интервала приводит к тому, что существующие системы автоматики запрещают выполнить отправление, т.к. расстояние между поездами при таком отправлении будет менее расчетного (при трехблочном разграничении поездов), однако, при отправлении поездов с применением технологии виртуальной сцепки с доработкой существующих систем автоматики, становится возможным уменьшение интервала попутного отправления еще на 1,7 мин. Минимальный интервал попутного отправления в рассматриваемом случае, при использовании технологии виртуальной сцепки ограничен синей и синей пунктирной линиями (рисунок 3.11), дальнейшее уменьшение интервала связано с тем, что в момент отправления ведомого поезда, хвост ведущего еще будет находиться на приемоотправочном пути или настолько близко к голове ведомого поезда (в примере выбрано минимальное значение расстояние до хвоста ведущего в момент отправления 200 м), что отправление ведомого возможно только по параллельному разгонному пути. При этом, чем меньше будет интервал попутного отправления и процент используемой силы тяги, тем больше должна быть длина разгонного пути.

Дальнейший шаг - определить при каком проценте силы тяги и интервалах попутного отправления возможно добиться движения поездов с двухблочным разграничением к концу заданного участка пути (например, второго участка удаления рисунок 3.12), а также определить влияние длин блок-участков и выбранного расстояния виртуальной сцепки на процесс отправления.

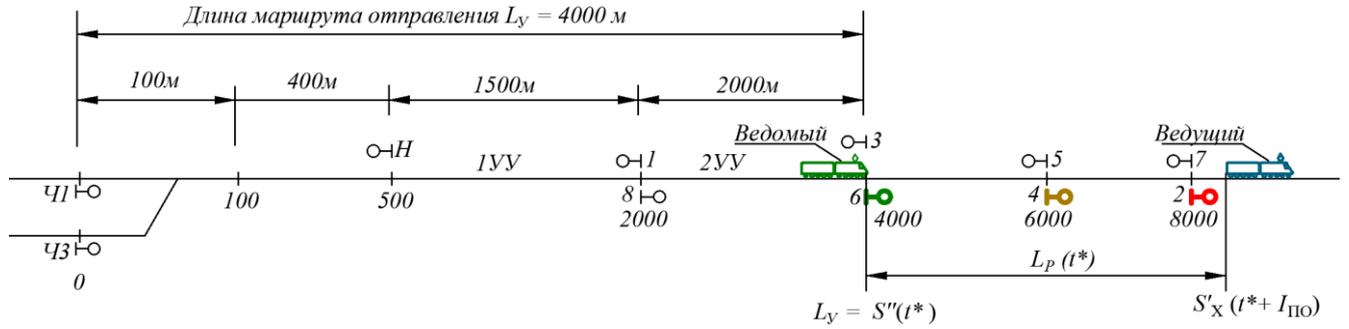


Рисунок 3.12 – Момент времени, когда поезда выходят на движение с двухблочным разграничением к концу второго участка удаления

Условие, согласно которому, расстояние между поездами в момент времени t , когда голова ведомого поезда будет находиться на ординате второго проходного светофора, должно быть больше, чем длина двухблочного разграничения:

$$S'_x(t + I_{\text{по}}) - S''(t) \geq L_{\text{д}}, \text{ при } S''(t) = L_y, \quad (3.4)$$

где t - момент времени достижения головой ведомого поезда координаты второго проходного светофора (конца второго участка удаления);
 $L_{\text{д}}$ - длина двухблочного разграничения поездов (расстояние виртуальной сцепки);
 L_y - длина участка пути от выходного до второго проходного светофора.

Изменение координат головы и хвоста поездов определяется по методике, описанной в п. 2.5 данной диссертации.

Для численного решения неравенства (3.4) необходимо определить границы входных данных для значений длин блок-участков. Для этого можно проанализировать длины блок-участков по данным электронной карты локомотивных систем.

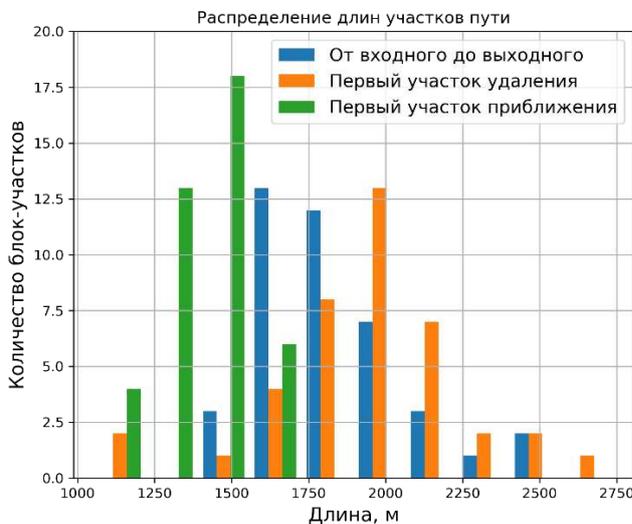
На рисунке 3.13 представлена статистика по длинам блок-участков одного из участков Свердловской железной дороги, всего было проанализировано 59 перегонов и 501 блок-участок. Статистика собрана на основании обработанного массива данных, подготовленного С.В. Бушуевым [180].

На рисунке 3.13а представлено распределение по длинам участков:

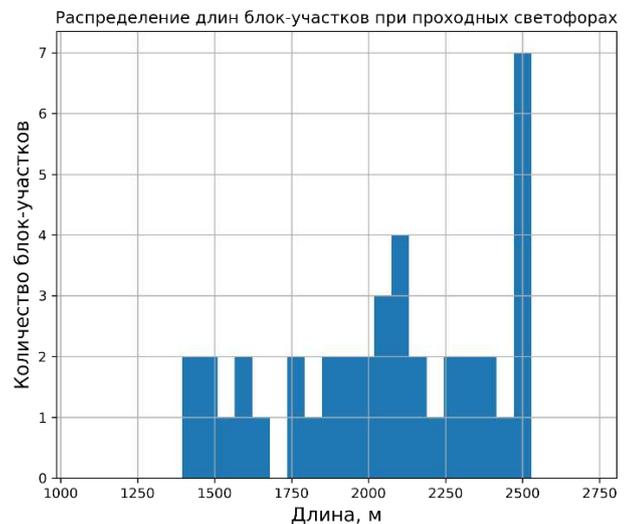
- от входного светофора до попутного выходного (синий цвет на рисунке 3.13а), по данному распределению можно оценить длину приемоотправочного пути совместно с длиной горловины станции;

- от выходного до первого проходного (оранжевый цвет на рисунке 3.13а), по данному распределению можно оценить длину горловины станции совместно с длиной первого участка удаления;

- от последнего проходного до входного светофора (зеленый цвет на рисунке 3.13а), по данному распределению можно оценить длины первых участков приближения.



а)



б)

Рисунок 3.13 – Распределение длин блок-участков по результатам анализа электронных карт (а – гистограмма распределения длин участков пути, б – гистограмма распределения длин блок-участков) [180]

На рисунке 3.13б представлено распределение длин остальных блок-участков рассматриваемого участка (те, что не попали в гистограмму 3.13а). Наиболее часто встречающаяся длина блок-участка составляет 2500 м, это связано с ограничением максимальной длины импульсной рельсовой цепи.

Результаты расчетов граничных условий по выражению (3.4) с учетом информации о существующих длинах участков и средних ускорений разгонов поездов приведены на рисунках 3.14, 3.15, 3.16.

Под граничными условиями понимается такой набор входных параметров моделирования, который обеспечивает выполнение условия описанного в (3.4). Так на рисунке 3.14 представлено семейство кривых обозначающее граничные значения интервалов и процента силы тяги для значений длин участка разгона L_y (от 2000 до 6000 м) при заданном расстоянии двухблочного разграничения L_d (расстояние виртуальной сцепки) 3000 м, также пунктиром обозначены границы при отправлении на зеленый и желтые сигналы выходного светофора, отправлении по разгонному пути. На рисунках 3.15 и 3.16 представлены аналогичные графики за исключением расстояния двухблочного разграничения (4000 м на рисунке 3.15 и 5000 м на рисунке 3.16).

Каждая точка на линии будет обозначать такой набор входных данных, при котором условие (3.4) выполняется. Например, на рисунке 3.15, все расчетные значения лежат левее пунктирной линии, обозначающей границу отправления по разгонному пути, это означает, что при таких входных параметрах, все рассмотренные варианты отправлений поездов в виртуальной сцепке должны происходить по параллельному разгонному пути. В большей степени это связано с заданным расстоянием двухблочного разграничения L_d (расстояние виртуальной сцепки). При коротких блок-участках (рисунок 3.15) на перегоне (при малом заданном расстоянии виртуальной сцепки) обеспечение движения с двухблочным разграничением может происходить только при таких интервалах попутного отправления и ускорениях, что хвост ведущего поезда не будет успевать освобождать путь для ведомого (требуется разгонный путь). При увеличении расстояния двухблочного разграничения

(расстояния виртуальной сцепки) часть точек расчетного семейства кривых попадает правее пунктирной линии, обозначающей границу отправок по разгонному пути. Например, на рисунке 3.16, при использовании 70% от силы тяги, для выхода на движение с заданным расстоянием двухблочного разграничения 5000 м требуется участок пути не менее 3000 м от выходного светофора, а минимальный интервал попутного отправления в таком случае составляет 5 мин. Если по технологической причине необходимо будет дальнейшее уменьшение интервала попутного отправления, тогда необходимо увеличивать долю используемой силы тяги или длину участка для выполнения разгона, либо применять данные меры совместно.

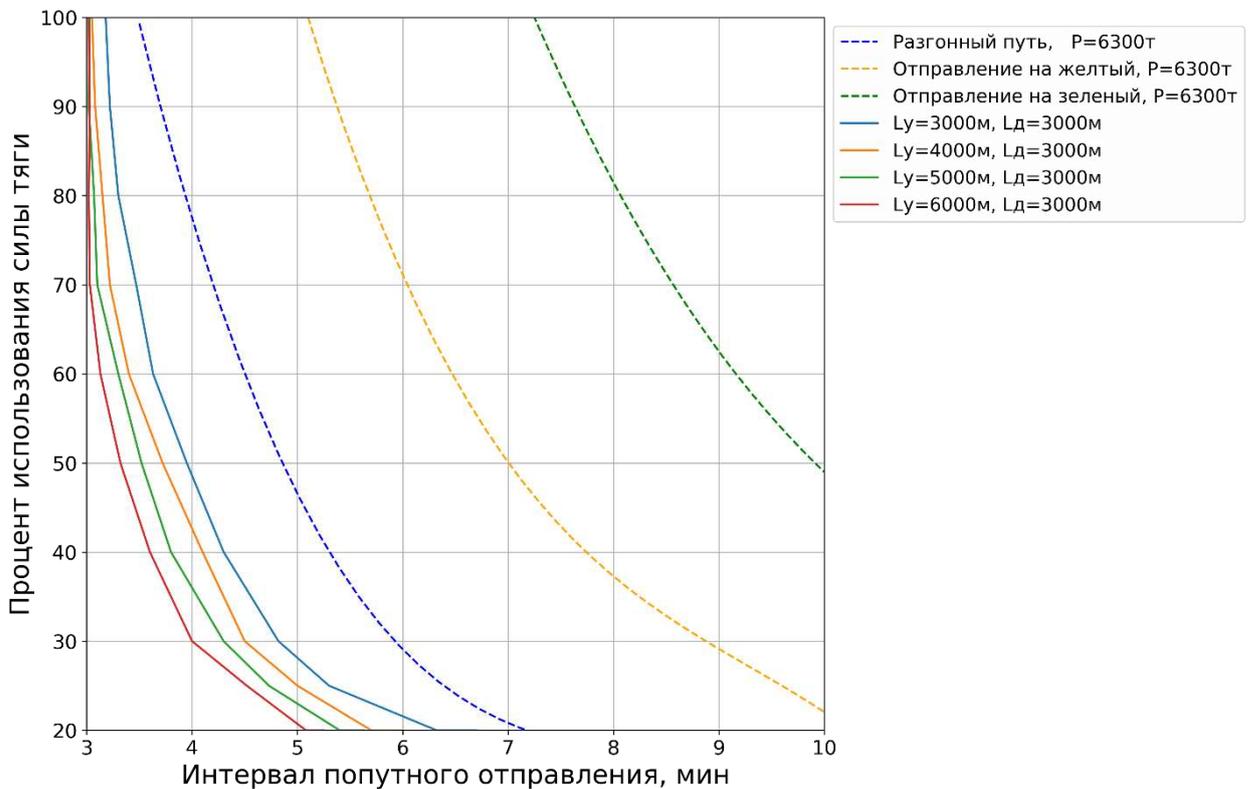


Рисунок 3.14 – Граничные условия при отправлении поездов в виртуальной сцепке и расстояния виртуальной сцепки 3000 м

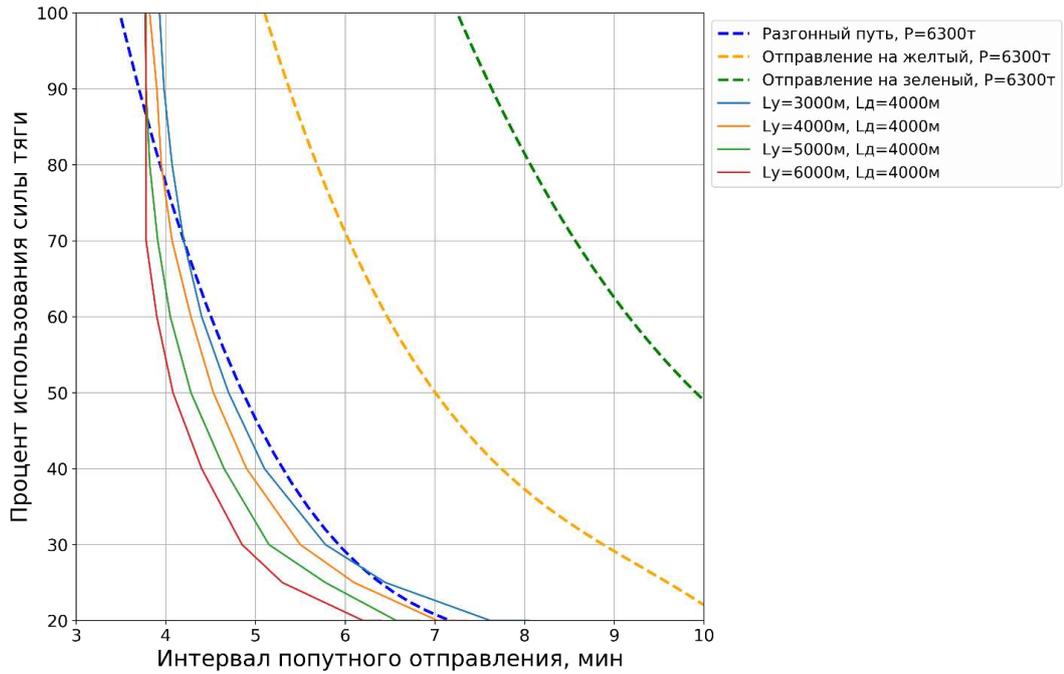


Рисунок 3.15 – Граничные условия при отпавлении поездов в виртуальной сцепке и расстояния виртуальной сцепки 4000 м

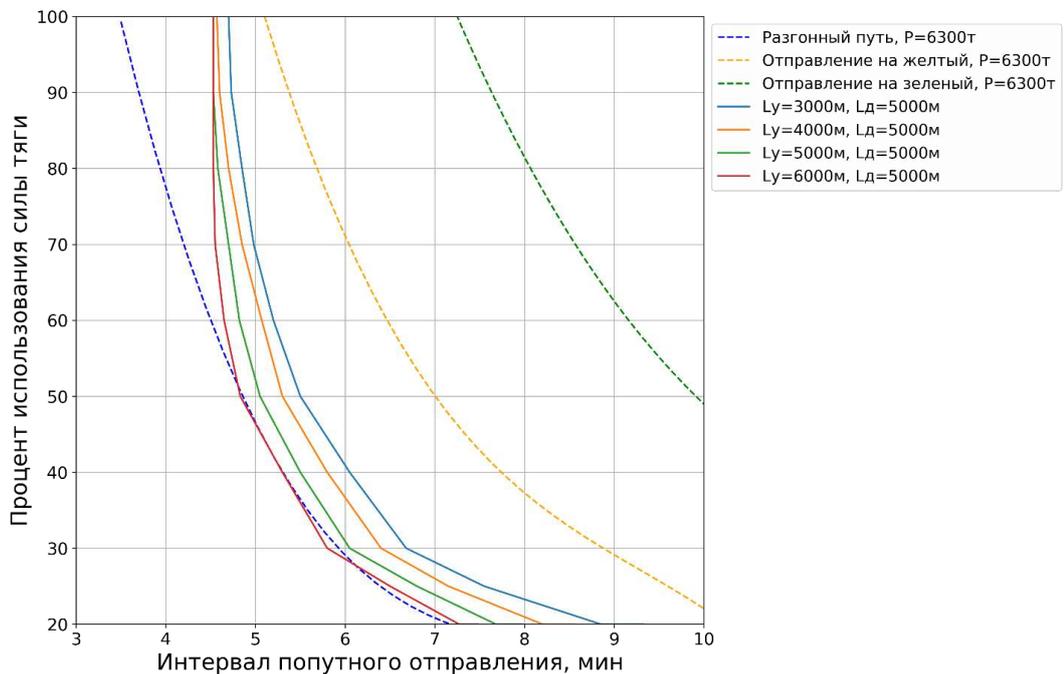


Рисунок 3.16 – Граничные условия при отпавлении поездов в виртуальной сцепке и расстояния виртуальной сцепки 5000 м

При увеличении расстояния двухблочного разграничения (расстояния виртуальной сцепки) до 5000 м (рисунок 3.16) семейство кривых смещается правее по

оси интервалов попутного отправления, а значит, вариантов реализации отправления поездов в виртуальной сцепке без применения разгонного пути становится еще больше. Таким образом, если на рассматриваемом участке необходимо применить технологию виртуальной сцепки для повышения пропускной способности за счет перехода к движению с двухблочным разграничением, помимо силы тяги и интервала попутного отправления на возможность технической реализации значительное влияние будут оказывать длины блок-участков. Так как в реальности комбинации длин участков и возможных ускорений поездов могут быть различны, и может получиться так, что требуется разгонный путь, необходимо более подробно рассмотреть процесс отправления поездов по разгонному пути.

3.2 Определение длины разгонного пути

Комбинация входных данных модели отправления поездов виртуальной сцепки может быть такой, при которой в момент отправления ведомого поезда, хвост ведущего еще не проследовал голову ведомого (рисунок 3.10в). В таком случае есть какое-то время после начала движения ведомого поезда, когда нет возможности отправить его на тот же путь, по которому движется ведущий поезд. Это означает, что ведомый поезд должен ускориться по параллельному разгонному пути, пока расстояние между поездами не начнет превышать длину тормозного пути ведомого поезда. Техническая реализация такого отправления поездов будет ограничена не только набором расстояния между поездами, но и алгоритмами безопасности, заложенными в электрической централизации. Стрелочный перевод соединяющий главный путь и разгонный сперва должен находиться в положении для движения ведущего поезда, а сразу после освобождения стрелочного перевода хвостом ведущего, должен быть переведен в положение для движения ведомого поезда (рисунок 3.17).

На рисунке 3.17 представлен процесс отправления ведомого поезда по разгонному пути. Ведущий поезд отправляется по главному пути по зеленым показа-

ниям светофоров (рисунок 3.17а), в это время для ведомого начинается отсчет заданного интервала попутного отправления. В момент времени равный интервалу попутного отправления, хвост ведущего поезда еще находится на приемо-отправочном пути, а для ведомого поезда загорается желтый сигнал выходного светофора (рисунок 3.17б). Далее оба поезда набирают скорость двигаясь по параллельным путям (рисунок 3.17в), но из-за наличия задержки отправления ведомого поезда в виде интервала попутного отправления, разница скоростей поездов такова, что ведущий поезд обгоняет ведомый. В момент времени, когда хвост ведущего поезда освобождает стрелочную секцию, содержащую стрелочный перевод, соединяющий разгонный и главный пути, необходимо перевести стрелку в минусовое положение (рисунок 3.17г).

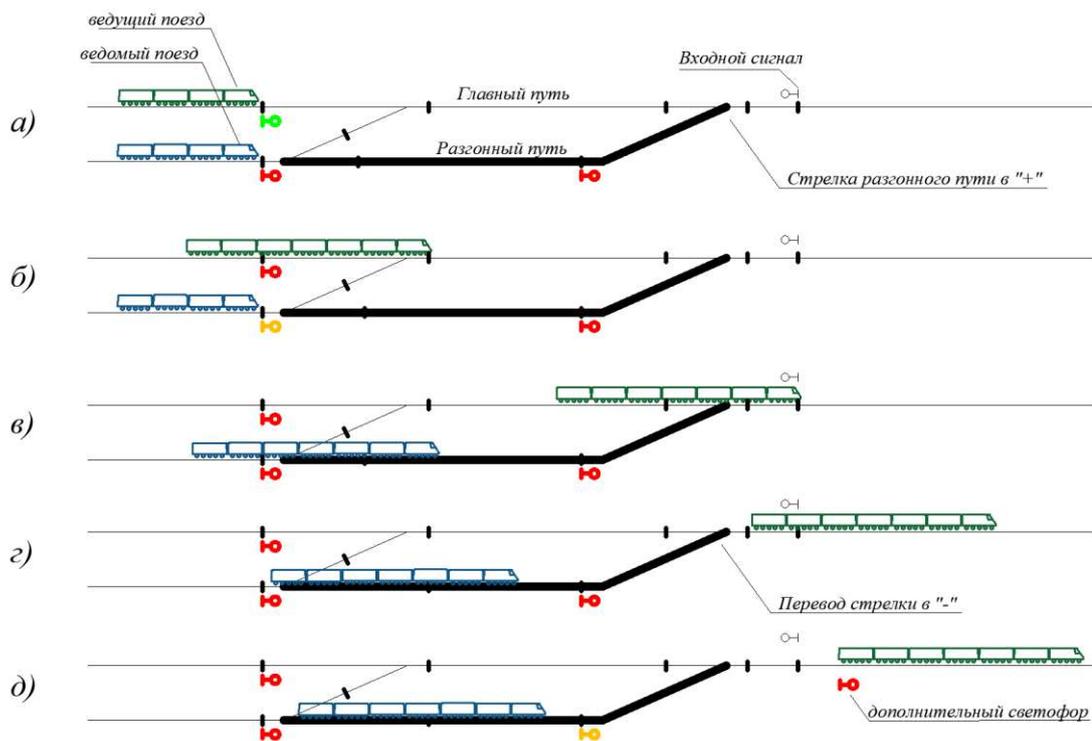


Рисунок 3.17 – Процесс отправления ведомого поезда по разгонному пути

(а – исходная позиция, оба поезда стоят,

б – момент трогания ведомого поезда,

в – процесс разгона ведомого поезда,

г – накопление маршрута для ведомого поезда,

д – момент открытия светофора для ведомого поезда)

Для установки маршрута по выходному светофору с разгонного пути необходимо чтобы между поездами был свободен хотя бы один участок, ограниченный светофорами. При проследовании хвоста ведущего поезда за первый проходной светофор или дополнительный светофор, возможно открытие выходного светофора с разгонного пути на желтое показание (рисунок 3.17д).

Выше был рассмотрен вопрос безопасного отправления ведомого поезда «на желтый под красный» (рисунок 3.8), однако в случае с разгонным путем, определяющим становится необходимость перевода стрелки между хвостом и головой разгоняющихся поездов. Такая ситуация является потенциально опасной и недопустима в классических системах электрической централизации, стрелка должна быть переведена перед приближающимся поездом, а в случае ее неисправности, поезд должен затормозить на границе неcodируемого защитного участка перед светофором, ограждающим данную стрелку. Также защитный участок необходим для остановки поезда в случае неисправной работы систем автоведения и превышения скорости. Длина этого участка должна быть больше, чем тормозной путь поезда с учетом времени необходимого для обнаружения смены кодирования.

При движении по параллельным путям расстояние между поездами должно стать таким, чтобы при сохраняющемся разгоне обоих поездов было достаточно времени на перевод стрелки (рисунок 3.18).

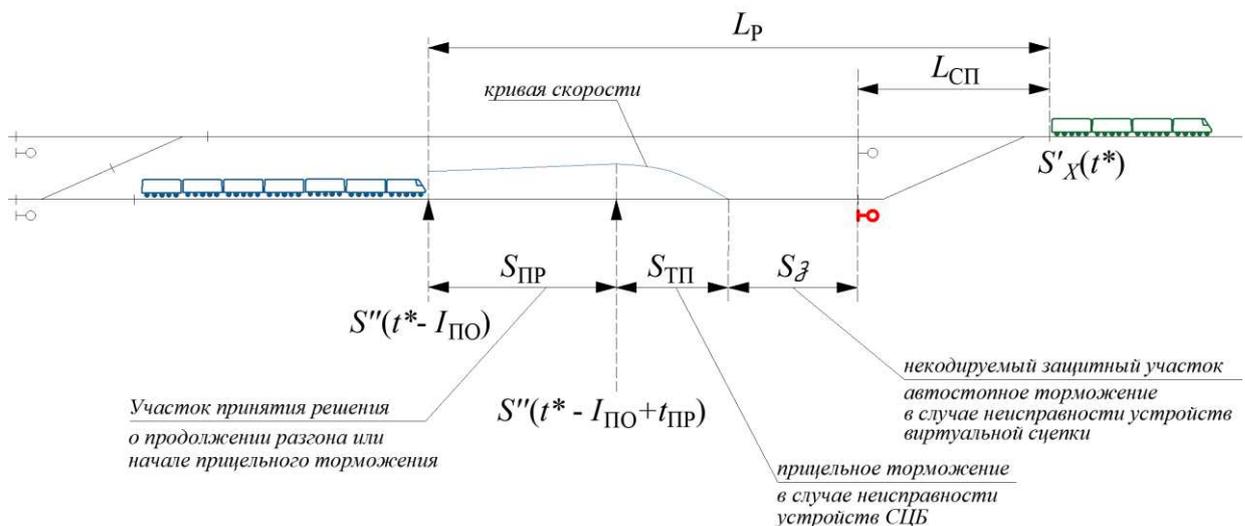


Рисунок 3.18 – Расстояние между поездами в момент перевода стрелки разгонного пути

Получается, что длина разгонного пути зависит от времени, которое заложено на перевод стрелки разгонного пути и скорости изменения расстояния между поездами. Время на перевод стрелки и установку маршрута по светофору с разгонного пути с учетом реакции систем и машиниста можно принять равным 30 с (время реакции машиниста 5 с, время на перевод стрелки 20 с и 5 с для установки маршрута). Участок пути, при ускоренном движении по которому в течение 30 с ведомый поезд ожидает установки маршрута называется участком «принятия решения», а время движения по этому участку «временем принятия решения» (рисунок 3.18). Под «принятием решения» подразумевается решение системы автоведения ведомого поезда о продолжении разгона, в случае успешного перевода стрелки и задания маршрута, или о выполнении прицельного торможения к светофору ограждающему стрелку разгонного пути. Длина участка для принятия решения, помимо заданного времени, будет зависеть от текущей скорости ведомого поезда:

$$S_{\text{ПР}}(t) = S''(t + t_{\text{ПР}}) - S''(t), \quad (3.6)$$

где $S_{\text{ПР}}(t)$ – длина участка принятия решения в каждый момент времени;

$S''(t + t_{\text{ПР}})$ – координата головы ведомого поезда в конце участка принятия решения;

$S''(t)$ – координата головы ведомого поезда в каждый момент времени;

$t_{\text{ПР}}$ – время принятия решения, длительность движения по участку принятия решения.

Участок принятия решения всегда должен располагаться в промежутке между головой ведомого и хвостом ведущего поездов, это означает что он зависит от расстояния между поездами, а значит и от интервала попутного отправления ведомого поезда. Поэтому при решении задачи определения длины разгонного пути стоит определять длину участка принятия решения только в те моменты времени, когда расстояние между поездами больше нуля, а выражение (3.6) изменить так, чтобы зависимость от движения ведущего поезда была очевидна:

$$S_{\text{ПР}}(t) = S'_{\text{Х}}(t) - L_{\text{СП}} - S_3 - S''(t - I_{\text{ПО}}) - S''_{\text{ТП}}(t - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}}), \quad (3.7)$$

где $L_{\text{СП}}$ – длина стрелочной секции разгонного пути;

$S_{\text{ТП}}(t - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}})$ – длина тормозного пути ведомого поезда в конце участка принятия решения;

S_3 – длина неcodируемого защитного участка перед светофором ограждающим стрелку разгонного пути.

Построены графики зависимости $S_{\text{ПР}}(t)$ и $S_{\text{ТП}}(t - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}})$ при среднем ускорении разгона $0,025 \text{ м/с}^2$ и интервале отправления ведомого поезда 4 мин (рисунок 3.19).

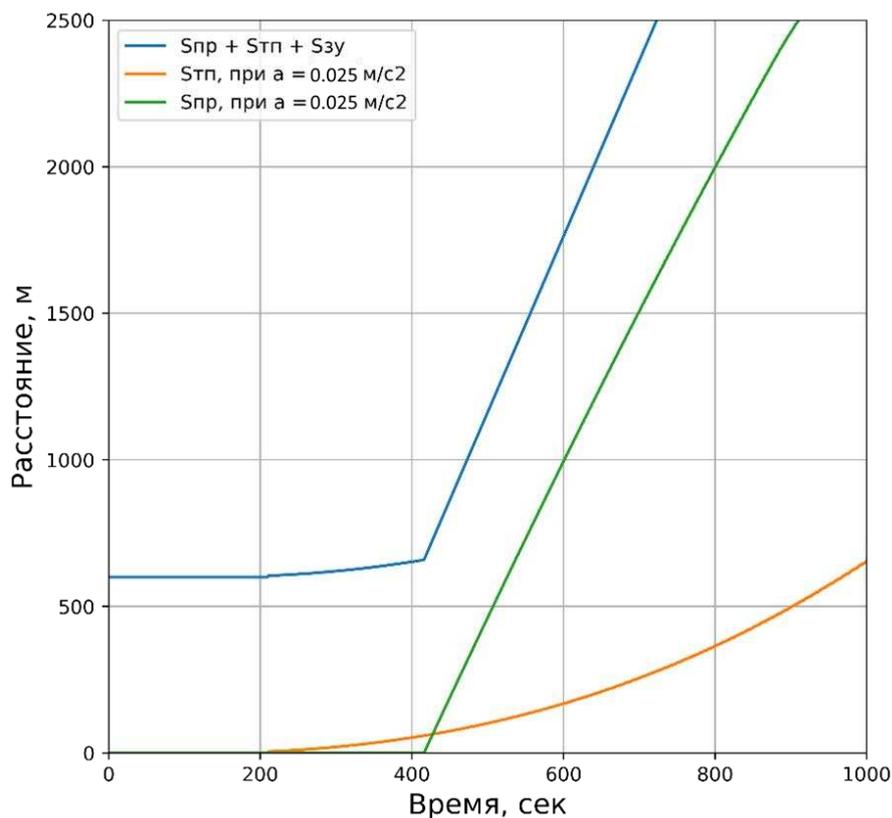


Рисунок 3.19 – График изменения длины участка принятия решения

Представленные на рисунке 3.19 зависимости дают представление о численных значениях длины участка принятия решения, но не позволяют понять равно ли время движения по этому участку времени принятия решения.

Зная длину участка принятия решения в каждый момент времени, можно определить время достижения точки конца участка принятия решения.

Построен график изменения времени достижения конца участка принятия решения для широкого диапазона интервалов попутного отправления при среднем ускорении разгона $0,025 \text{ м/с}^2$ (рисунок 3.20).

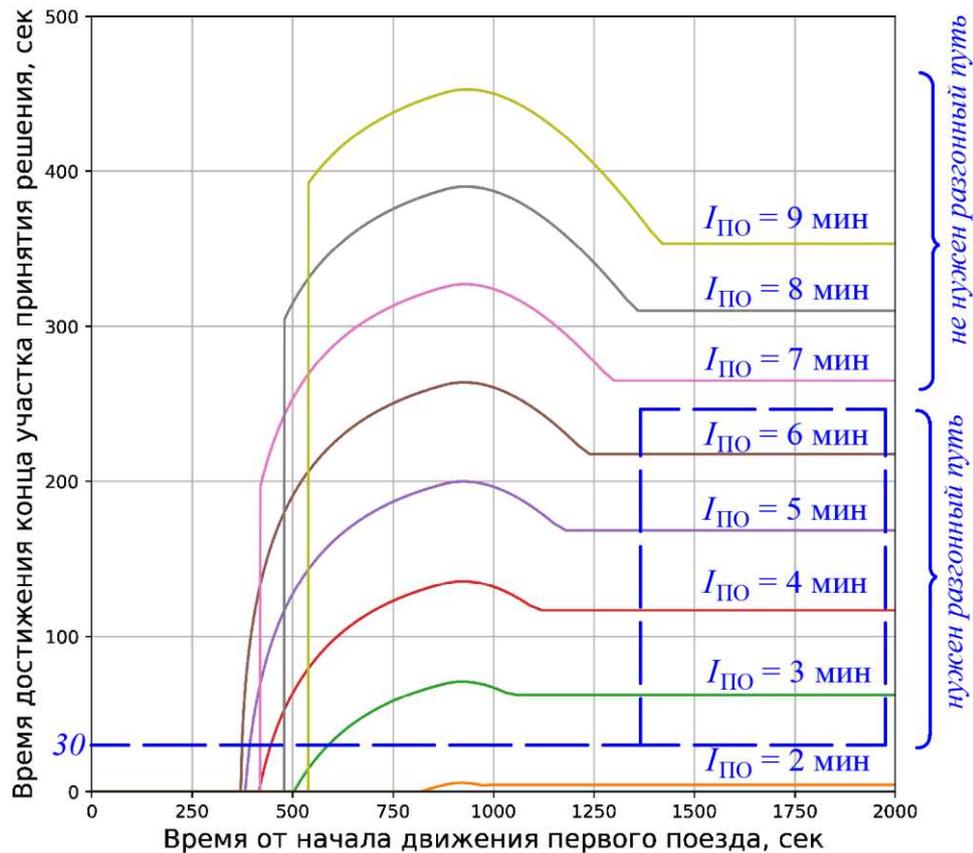


Рисунок 3.20 – Изменение времени достижения конца участка принятия решения после трогания поездов с разным интервалом попутного отправления при среднем ускорении разгона $0,025 \text{ м/с}^2$

Представленные на рисунке 3.20 графики изменения времени достижения точки конца участка принятия решения позволяют оценить при каких интервалах попутного отправления в момент трогания ведомого поезда, время движения по участку принятия решения сразу больше 30 с. Это означает, что при этих интерва-

лах попутного отправления разгонный путь не нужен, т.к. расстояние между поездами в момент трогания больше, чем требуемое, а значит возможно отправление поездов по одному пути. Рассмотрим результаты подробнее:

- при среднем ускорении разгона $0,025 \text{ м/с}^2$ и времени принятия решения 30 с, при отправлении с интервалом от 7 мин и выше, разгонный путь не нужен, но требуется проверить на необходимость установки дополнительных светофоров, обеспечивающих разгон ведомого поезда «под желтый на красный»;

- при отправлении ведомого поезда с интервалом 1 мин, для рассматриваемого случая (ускорения поездов и длина поездов) невозможно организовать движение поездов по одному пути перегона, поскольку разница скоростей поездов будет недостаточной для того, чтобы между поездами был свободный участок пути;

- при интервале попутного отправления 2 мин, не выполняется заданное условие о равенстве времени принятия решения 30 с;

- при отправлении с интервалами от 3 до 6 мин в рассматриваемом случае, время достижения конца участка принятия решения после трогания ведомого поезда постепенно увеличивается.

При разгоне ведомого поезда (от 3 до 6 мин) расстояние между поездами постепенно растет, и затем, становится таким, что в него укладывается:

- участок принятия решения, такой длины, что ведомому поезду потребуется 30 с на его преодоление при продолжающемся разгоне;

- участок пути для выполнения прицельного торможения, в случае отказа устройств;

- защитный участок, для экстренного торможения в случае отказа систем автоторможения;

- участок пути, в котором должна быть размещена стрелка разгонного пути.

Необходимо вычислить момент времени, когда время движения по участку принятия решения впервые становится равным 30 с, можно определить длину разгонного пути:

$$L_{\text{РП}} = S'_{\text{X}}(t^*) - L_{\text{СП}}, \quad (3.8)$$

$$L_{\text{РП}} = S''(t^* - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}}) + S''_{\text{ТП}}(t^* - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}}) + S_3.$$

Приравняем полученные выражения:

$$S'_{\text{X}}(t^*) - L_{\text{СП}} - S''(t^* - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}}) - S''_{\text{ТП}}(t^* - I_{\text{ПО}} + t_{\text{ПР}}) - S_3 = 0. \quad (3.9)$$

Полученное выражение (3.9) описывает движение поездов виртуальной сцепки при отправлении по разгонному пути. Искомой величиной является момент времени t^* . Решить (3.9), можно раскрывая члены с помощью теории тяговых расчетов, или прибегнуть к методике расчета, описанной в п. 2.5 данной диссертации. Применение тяговых расчетов даст более точный результат, но аналитическая запись получится громоздкой.

По результатам расчетов для разных значений интервала попутного отправления и процента используемой силы тяги получены следующие значения длин разгонного пути (рисунок 3.21).

Минимальная длина разгонного пути ограничена длиной защитного участка перед светофором, ограждающим стрелку разгонного пути. Длина защитного участка должна быть достаточной для выполнения торможения поезда при превышении скорости. На рисунке 3.21а представлены результаты расчета разгонного пути для поезда массой 2800 т (на рисунке 3.21б для поезда массой 6300 т) при длине защитного участка 600 м, 460 м на торможение поезда со скорости 60 км/ч и 140 м, которые проедет поезд при продолжающемся разгоне до момента включения автотормозов.

При разных интервалах попутного отправления и процентах силы тяги, ведомый поезд будет набирать разную скорость к концу разгонного пути, поэтому длина защитного участка может быть переменной и должна определяться при расчетах на реальном участке.

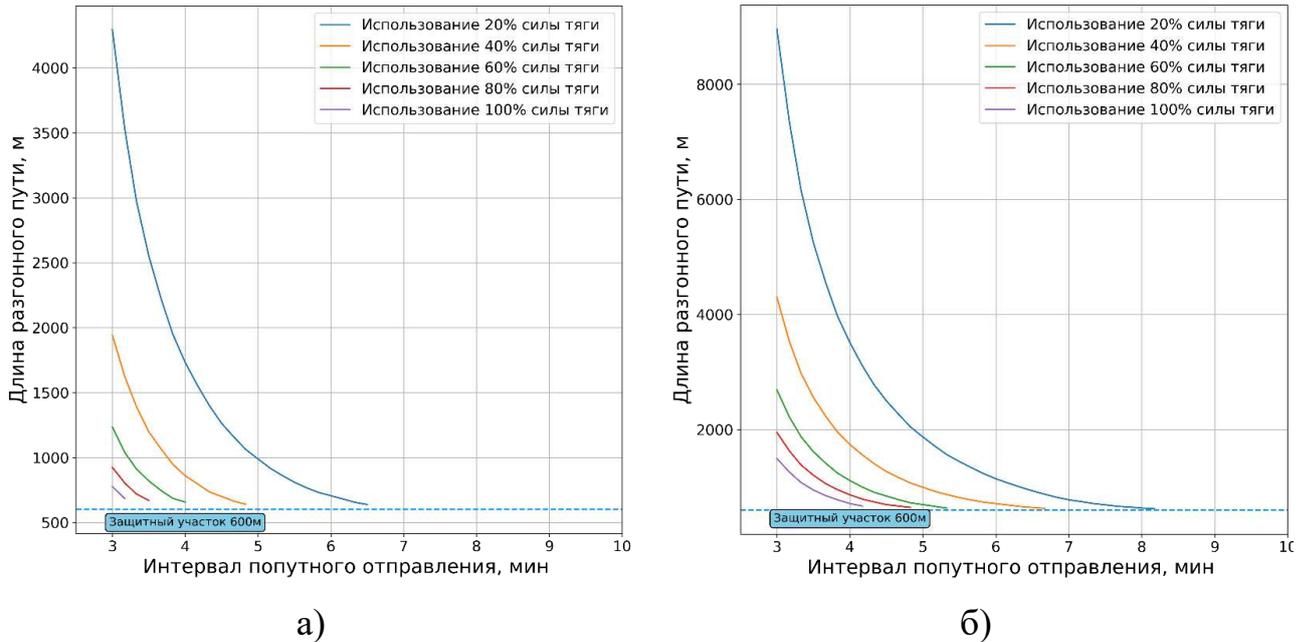


Рисунок 3.21 - Зависимость длины разгонного пути от интервала попутного отправления при разных ускорениях
(а – масса поездов 2800 т, б – масса поездов 6300 т)

При использовании 20% силы тяги поезда массой 6300 т разгонный путь необходим даже при 8 минутном интервале попутного отправления, его длина должна составлять 646 м, возможно, что на станции будет участок пути, по которому можно будет двигаться параллельно главному пути, тогда строительство разгонного пути не потребуется, но изменения работы электрической централизации не избежать. Либо придется найти способ увеличить ускорение поезда (например, за счет увеличения процента используемой силы тяги). Представленные расчеты длины разгонного пути сообщают о необходимости организации разгонного пути, и его длине, но важным остается вопрос изменения расстояния между поездами при движении по перегону, для обеспечения движения с двухблочным разграничением. Как правило, разгонный путь нужен при низких ускорениях и низких интервалах попутного отправления, это означает также то, что и расстояние между поездами будет изменяться медленно, и скорость выхода поездов виртуальной сцепки на двухблочное разграничение будет низка. Например при среднем ускорении разгона $0,01 \text{ м/с}^2$ (соответствует 20% использования силы тяги при массе поезда 6300 т) и

интервале в 5 мин, ведомому поезду требуется разгонный путь длиной 2000 м, а на двухблочное разграничение (при длине блок-участка 2000 м) поезда выйдут спустя 30 мин после начала движения, за это время ведущий поезд уедет на расстояние 16 км от выходного светофора, и все это время поезда будут ехать в режиме «под желтый на красный» если не будут пересмотрены технические решения систем интервального регулирования на перегонах.

Таким образом, применение разгонного пути целесообразно в случае необходимости обеспечения наименьших межпоездных интервалов. При этом необходимо учитывать, что при низких ускорениях (невозможность увеличения тягового ресурса из-за массы поезда или профиля пути) время выхода на заданное расстояние ВСЦ может быть большим. При 100% использовании силы тяги на горизонтальном участке пути достаточным будет строительство разгонного пути длиной 1800 м, чтобы обеспечить отправление поездов массой до 6300 т с интервалами 3-4 мин. При необходимости организации движения поездов с низкими ускорениями (тяжелые поезда или отсутствует возможность использования полной силы тяги) при межпоездных интервалах 3-4 мин, длина требуемого разгонного пути будет сопоставима с длиной третьего главного пути перегона.

3.3 Моделирование попутного приема поездов в виртуальной сцепке

3.3.1 Цель моделирования

Цель моделирования попутного прибытия поездов в виртуальной сцепке заключается в том, чтобы удостовериться, что время приема поездов на станцию с остановкой (интервал попутного прибытия) не станет ограничением для интервала попутного отправления. Другими словами, для обеспечения движения поездов ВСЦ с двухблочным разграничением, необходимо определить такой межпоездной интервал, отправление с которым не вызывало бы задержек при приеме на станцию с остановкой, т.е. интервал попутного прибытия должен быть равен или меньше, чем интервал попутного отправления.

Моделируемый железнодорожный участок содержит станцию и 3 участка приближения. При этом, согласно [175], длина участка приближения не более 1500 м. Длина второго и третьего участка приближения составляет 2000 м. Длина горловины (от входного сигнала до начала приема-отправочного пути) составляет 500 м, а длина пути приема – 1050 м.

Чтобы уменьшение скорости ведущего поезда не вызывало снижение скорости ведомого поезда, алгоритмы системы автоведения в составе виртуальной сцепки, должны быть настроены на поддержание заданного интервала времени между поездами [1–3; 6], тогда оба поезда, в штатном режиме, будут начинать снижение скорости при проследовании примерно одной и той же точки пути (рисунок 3.22).

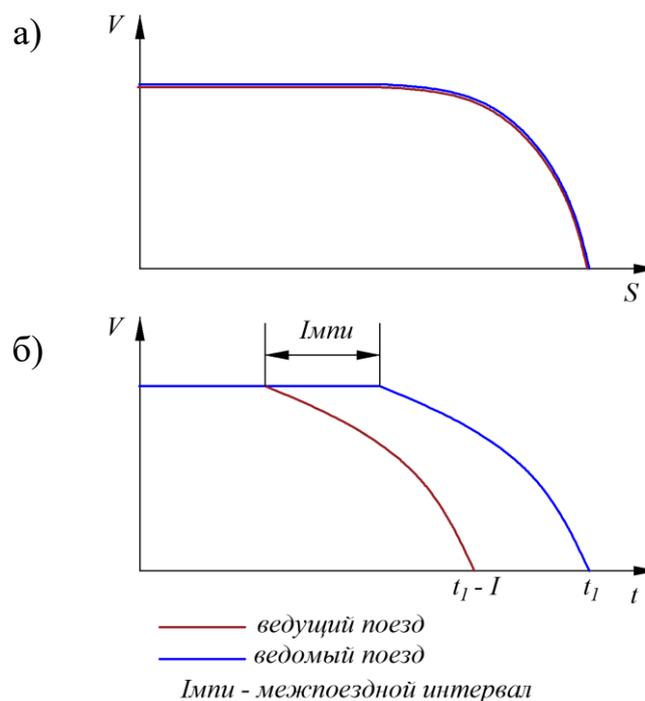
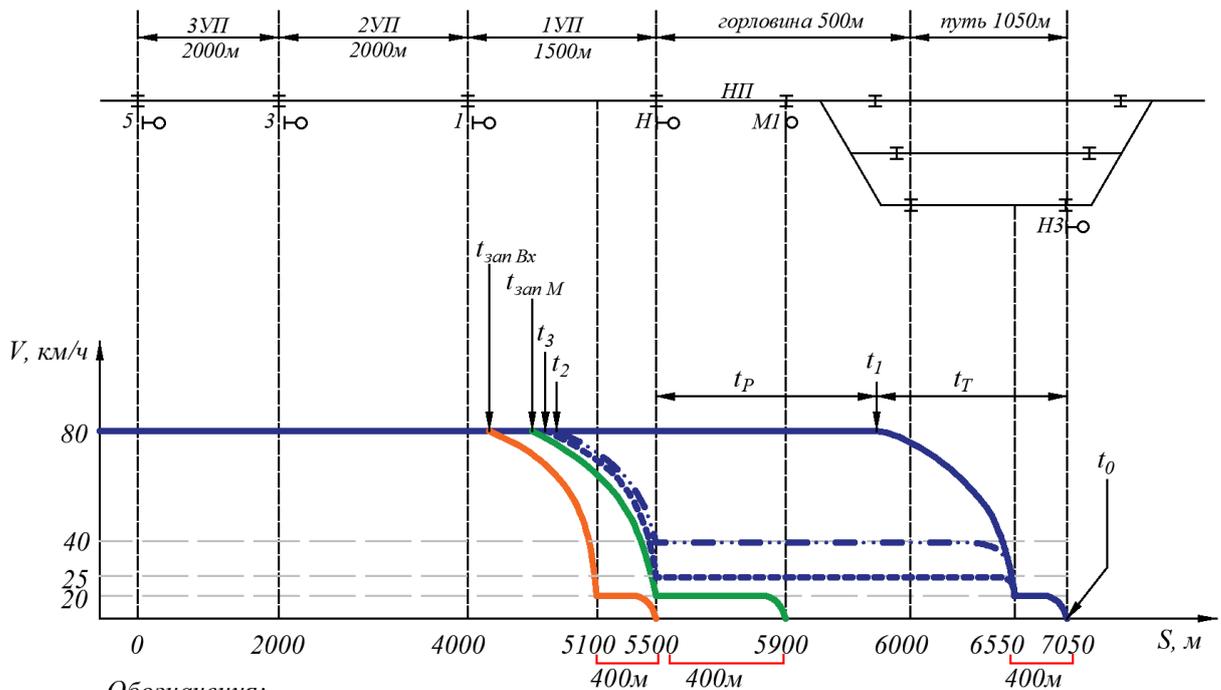


Рисунок 3.22 – Управление поездами в виртуальной сцепке с алгоритмом поддержания интервала времени (а – кривая скорости поездов в виртуальной сцепке, б – график изменения скорости поездов в виртуальной сцепке)

При этом расстояние между поездами должно быть достаточным для того, чтобы можно было осуществить безопасный перевод стрелки между ведущим и ведомыми поездами (кроме случая приема двух поездов на станции продольного типа).

3.3.2 Моделируемые ситуации

Рассмотрены различные технологические схемы попутного прибытия поездов ВСЦ на станцию и кривые скорости, которые получаются в результате выполнения торможения (рисунок 3.23).



Обозначения:

- t_0 - момент остановки поезда у выходного светофора;
- t_1 - момент начала торможения к выходному светофору без ограничений по скорости;
- t_2 - момент начала торможения к выходному светофору, ограничение скорости 40 км/ч за входным;
- t_3 - момент начала торможения к выходному светофору, ограничение скорости 25 км/ч за входным;
- $t_{зан М}$ - момент начала торможения к закрытому маневровому светофору за входным светофором;
- $t_{зан Вх}$ - момент начала торможения к закрытому входному светофору;
- t_P - время равномерного движения по станции;
- t_T - время выполнения остановки к выходному светофору.

Рисунок 3.23 – Моделируемые кривые скорости для вычисления интервалов попутного прибытия

1. Ведущий и ведомые поезда начинают снижение скорости для остановки только в момент времени, когда расстояние до выходного светофора будет равняться пути прицельного торможения к выходному светофору. В таком случае, интервал попутного прибытия будет вычисляться как сумма времени, затраченного на равномерное движение по станции (t_p на рисунке 3.23) и времени, затраченного на торможение (t_T на рисунке 3.23). Тогда, если межпоездной интервал равен интервалу попутного прибытия, в момент остановки ведущего поезда, голова ведомого будет находиться на ординате входного светофора. Движение поездов с таким интервалом возможно только при высоком уровне безопасности, обеспечиваемым системами автоведения и напольными устройствами автоматики.

2. Ведущий и ведомые поезда начинают снижение скорости перед входным светофором, за входным установлено ограничение скорости в 40 км/ч. Интервал попутного прибытия будет рассчитываться как разница моментов времени начала (t_2 на рисунке 3.23) и конца торможения (t_0 на рисунке 3.23).

3. Ведущий и ведомые поезда начинают снижение скорости перед входным светофором, за входным установлено ограничение скорости в 25 км/ч. Интервал попутного прибытия будет рассчитываться как разница моментов времени начала (t_3 на рисунке 3.23) и конца торможения (t_0 на рисунке 3.23).

4. Ведущий поезд начинает снижение скорости перед входным светофором, после которого установлено ограничение 40 км/ч. Ведомый поезд едет с интервалом времени, который позволяет выполнить прицельное служебное торможение к входному сигналу, в случае возникновения проблем с установкой маршрута после прохода ведущего поезда. Можно сказать, что в таком случае у ведомого поезда есть запас по торможению ко входному сигналу. Интервал попутного прибытия будет вычисляться как разница моментов времени начала торможения ведомого поезда к входному сигналу ($t_{\text{зап. Вх.}}$ на рисунке 3.23) и момента остановки ведущего поезда (t_0 на рисунке 3.23).

5. Поезда едут аналогично схеме №4, но к интервалу попутного прибытия добавлена 1 мин, в течении которой, машинист ведомого поезда ожидает открытия входного сигнала. По истечении этого времени, система автоведения принимает

решение о начале служебного торможения к закрытому входному сигналу. Введение добавочной минуты повышает безопасность движения, за счет увеличения расстояния между поездами и времени на поиск альтернативного способа приема ведомого поезда на станции.

6. Ведомый поезд едет аналогично схеме №4, а ведущий поезд начинает снижение скорости перед входным светофором, после которого установлено ограничение 25 км/ч. Интервал попутного прибытия будет вычисляться как разница моментов времени начала торможения ведомого поезда к входному сигналу ($t_{\text{зап. Вх.}}$ на рисунке 3.23) и момента остановки ведущего поезда (t_0 на рисунке 3.23). Поскольку за входным светофором установлено ограничение скорости 25 км/ч, момент времени остановки поезда наступает позже, чем в предыдущей схеме, поэтому и интервал попутного прибытия будет больше.

7. Ведущий поезд начинает снижение скорости перед входным светофором, после которого установлено ограничение 40 км/ч. Ведомый едет с интервалом позволяющим выполнить прицельно торможение к маневровому сигналу за входным светофором, это позволит уменьшить интервал попутного прибытия относительно случаев описанных в п.5 и п.6. Интервал попутного прибытия будет вычисляться как разница моментов времени начала торможения ведомого поезда к входному сигналу ($t_{\text{зап. М.}}$ на рисунке 3.23) и момента остановки ведущего поезда (t_0 на рисунке 3.23).

8. Поезда едут аналогично случаю №6, за исключением ограничения скорости движения за входным 25 км/ч. Интервал попутного прибытия будет вычисляться как разница моментов времени начала торможения ведомого поезда к входному сигналу ($t_{\text{зап. М.}}$ на рисунке 3.23) и момента остановки ведущего поезда (t_0 на рисунке 3.23).

Во всех рассматриваемых случаях, согласно требованиям [175], за 400 м до светофора с красным показанием, скорость поезда не превышает 20 км/ч.

3.3.3 Описание выполняемых расчетов

Чтобы определить описанные моменты времени, необходимо построить соответствующие кривые скорости остановки поездов на станции (рисунок 3.23). Для этого использована представленная во второй главе данной диссертации методика расчета на основе ускорений поездов. Получить значения ускорений поездов в процессе торможения можно на основе статистических данных из локомотивных устройств реальных поездов [140], или из нормативных таблиц тормозных путей с разных начальных скоростей для разных уклонов и тормозных коэффициентов, представленных в правилах эксплуатации тормозов [174].

Понятие тормозного пути, и значения, указанные в таблицах [174], включают в себя пройденный путь поездом за время подготовки к торможению (срабатывания устройств, распространения тормозной волны) и непосредственно торможения. Поэтому для вычисления ускорений торможения, по табличным данным, необходимо вычесть подготовительную часть тормозного пути.

$$S_{\text{ТП}}(V_{\text{Н}}, u, t_{\text{Р}}) = S_{\text{П}}(V_{\text{Н}}, t_{\text{Р}}) + S_{\text{Д}}(V_{\text{Н}}, u) \quad (3.10)$$

где $S_{\text{ТП}}$ – тормозной путь, указанный в таблицах [174];

$S_{\text{П}}$ – подготовительная часть тормозного пути;

$S_{\text{Д}}$ – непосредственно тормозной путь;

$V_{\text{Н}}$ – начальная скорость;

u – уклон;

$t_{\text{Р}}$ – время реакции системы на начало торможения.

Согласно нормативной документации, скорость распространения тормозной волны должна быть не менее 250 м/с, поэтому при длине поезда в 1000 м, время распространения составляет 4 с. При расчетах, предлагается учитывать еще 4 с на реакцию машиниста и других локомотивных систем, тогда суммарное время реакции составит 8 с. Зная также значения начальных скоростей и уклонов, из формулы

(3.10) можно определить значения пройденного пути $S_{д}$ в процессе непосредственного торможения.

Табличные значения тормозных путей даны для начальных скоростей от 10 до 140 км/ч с шагом 5 км/ч, такой шаг дискретизации недостаточен для целей моделирования остановки поездов на станциях, поэтому необходимо интерполировать полученные значения $S_{д}$. Для интерполирования использовался полином 6 степени.

Затем можно вычислить ускорения в зависимости от текущей скорости, уклона и тормозного коэффициента:

$$a_{Ti} = \frac{V_i - V_{i-1}}{S_{ди} - S_{ди-1}}, \quad (3.11)$$

где a_{Ti} – ускорение торможения при начальной скорости V_i ;

V_{i-1} – начальная скорость на предыдущем шаге расчета;

$S_{ди}$ – тормозной путь на i шаге расчета;

$S_{ди-1}$ – тормозной путь на $i-1$ шаге расчета.

В результате вычислений по формулам (3.10), (3.11) получены зависимости ускорений торможения грузовых поездов длиной 1000 м от текущей скорости, для разных тормозных коэффициентов и уклонов. Пример полученных зависимостей, для торможения поездов на участке пути без уклонов, представлен на рисунке 3.24.

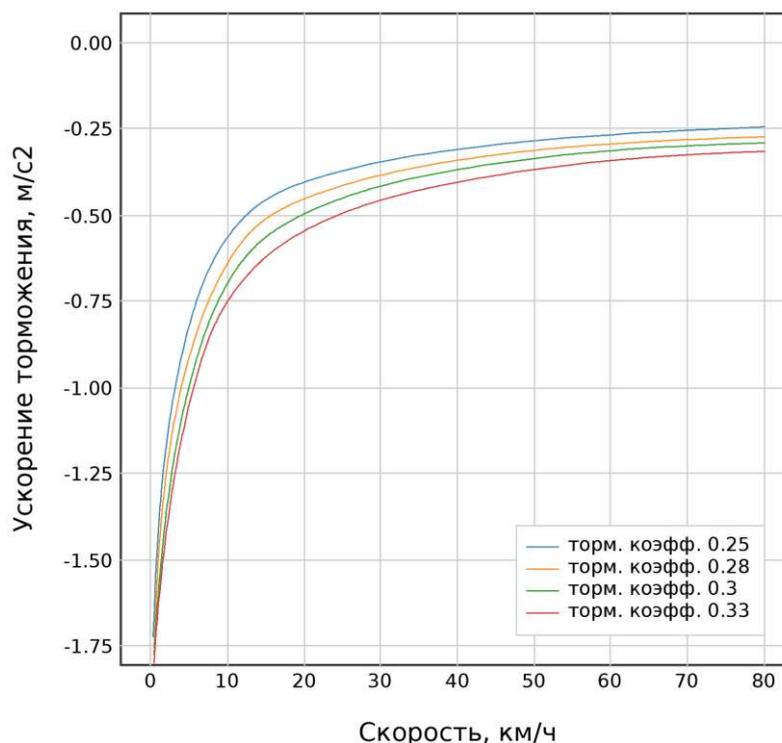


Рисунок 3.24 – Зависимости ускорений торможения от скорости

Далее, используя полученные значения ускорений торможения, по формулам (2.6) и (2.8) определяется изменение скорости и пройденного пути для рассмотренных технологических схем приема поездов на станцию при уклоне пути 0 и минус 2‰ и диапазона тормозных коэффициентов от 0,2 до 0,4. Выбор значений уклонов связан с тем, что по нормативной документации [175], железнодорожные станции не могут располагаться на участках с уклоном больше 1,5‰.

Выбор диапазона тормозных коэффициентов также связан с нормативными значениями, для грузовых поездов принимается 0,33 [174]. Однако стоит отметить, что полное использование тормозных сил происходит только при экстренном торможении, т.е. при проверке силы тормозного нажатия грузового поезда, проверяется его возможность выполнения экстренного торможения согласно установленному нормативу. В процессе движения используется лишь часть от максимального тормозного нажатия. Помимо экстренного торможения, применяемого в случае, если дальнейшему движению грозит опасность, различают:

- полное служебное торможение, применяемое в исключительных случаях, когда необходимо выполнить торможение за короткий отрезок пути;

– ступенчатое служебное торможение (1, 2 и 3 ступени).

Доля использования тормозного коэффициента при разных видах торможения приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Использование тормозного коэффициента [61]

Режим торможения	Снижение давления в тормозной магистрали, кгс/см ²	Реализуемая доля расчетного тормозного коэффициента
Экстренное	3,4-3,5	1,0
Полное	1,5-1,7	0,8
Служебное III ступень	1,2-1,3	0,7
Служебное II ступень	0,9-1,0	0,5
Служебное I ступень	0,6-0,7	0,3

Также стоит отметить, что у груженых поездов тормозной коэффициент может быть выше нормы, а у порожних ниже. В связи этим, при моделировании используется диапазон тормозных коэффициентов от 0,2 до 0,4. Для выполнения моделирования попутного прибытия поездов по описанной методике, применялся язык программирования *Python*, в приложении А представлены листинги программного кода.

3.3.4 Описание результатов моделирования

На рисунке 3.25 представлены зависимости интервала попутного прибытия, полученного в результате моделирования описанных в п. 3.3.2 технологических схем приема поездов на станцию с остановкой, от тормозного коэффициента. Каждая кривая представленная на графике, представляет собой результаты расчета интервала попутного прибытия по одной из описанных схем приема.

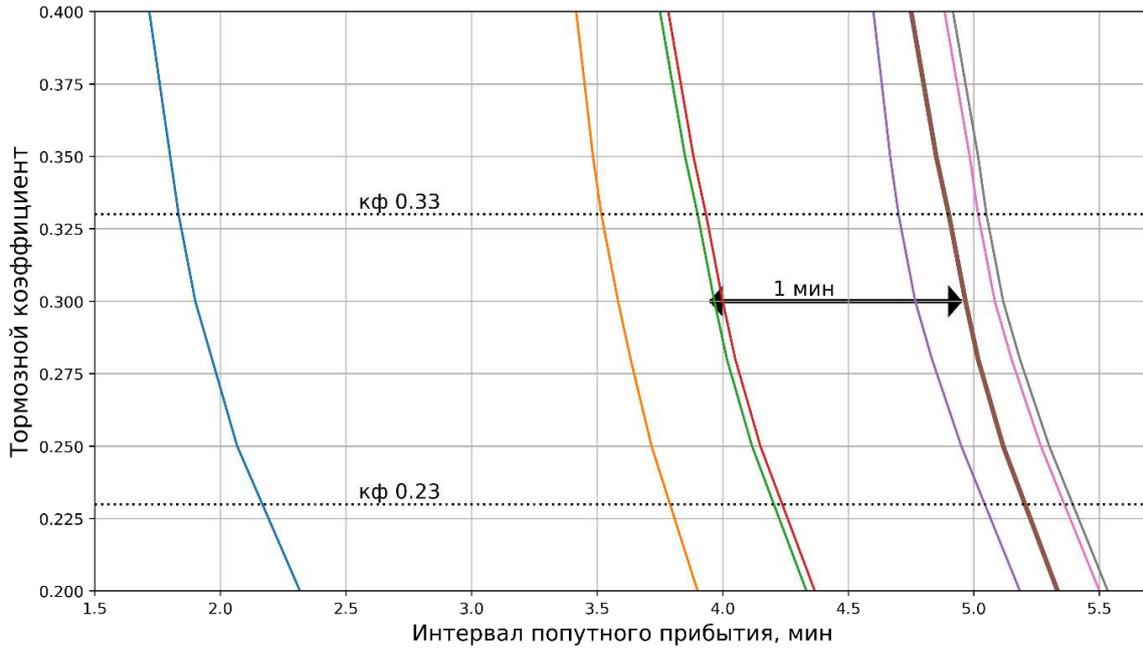
Чтобы оценить разницу между максимальным и минимальным реализуемыми тормозными коэффициентами, на график были добавлены горизонтальные линии, обозначающие нормативное значение тормозного коэффициента (0,33) и

70% от нормативного, т.е. 0,23, которое будет соответствовать выполнению III ступени служебного торможения.

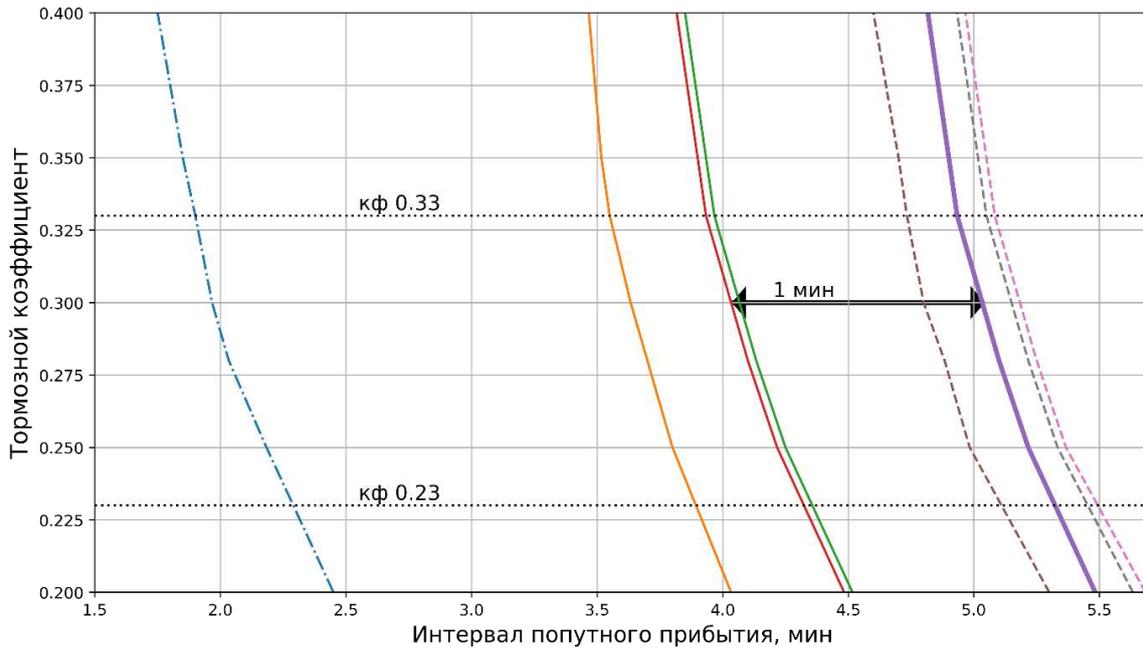
Наименьший интервал попутного прибытия достигается при снятии всех ограничений скоростей (штрихпунктирная линия на рисунке 3.25). Добавление ограничения скорости за входным сигналом, сразу увеличивает интервал попутного прибытия на 1,5 мин, дальнейшее усложнение схем приема (введение запаса по торможению к входному или маневровому сигналу) приводит к увеличению интервала еще на 0,5 мин, при этом нет особой разницы при закладывании запаса ко входному светофору, или маневровому сигналу за ним (красная и зеленая линии на рисунке 3.25). Очевидно, что еще большее ограничение скорости за входным приводит к увеличению интервалов попутного прибытия (пунктирные линии на рисунке 3.25). Поэтому, если в маршруте приема есть стрелки крутой марки крестовины (1/9 и круче), необходимо рассматривать вариант их замены, это позволит уменьшить интервал попутного прибытия в среднем на 1 мин, для станций с горловинами до 500 м.

Наилучшим, с точки зрения обеспечения движения поездов в виртуальной сцепке, без задержек при входе на станцию, является такой интервал, при котором есть запас по торможению, а также время на принятие решения. Такая ситуация описана в схеме приема №5 п. 3.3.2 (на рисунке 3.25 обозначено утолщенной фиолетовой линией). Предельное значение интервала попутного прибытия в таком случае составляет не менее 5,5 мин для моделируемых условий, уменьшить его можно, за счет снятия ограничения скорости за входным сигналом, либо уменьшения времени на принятие решения.

Для участка, находящегося на профиле пути без уклона результаты представлены на рисунке 3.25а, а для уклона минус 2‰ на рисунке 3.25б. Сравнивая аналогичные кривые, видно, что уклон влияет на интервал попутного прибытия в незначительной степени, а именно, интервалы попутного прибытия, для участка пути с уклоном минус 2‰ больше на 1,39%.



а) Уклон=0 %, за 400 м до запрещающего сигнала ограничение скорости 20 км/ч



б) Уклон=-2 %, за 400 м до запрещающего сигнала ограничение скорости 20 км/ч

- 1) Прицельное торможение к выходному, без ограничений по скорости
- 2) Прицельное торможение к выходному, за входным ограничение скорости 40 км/ч
- 3) Прицельное торможение к выходному, с учетом запаса на торможение ко входному, ограничение скорости 40 км/ч за входным
- 4) Прицельное торможение к выходному, с учетом запаса на торможение к маневровому за входным, ограничение скорости 40 км/ч за входным
- 5) Прицельное торможение к выходному, ограничение скорости 25 км/ч за входным
- 6) Прицельное торможение ко входному, ограничение скорости 40 км/ч за входным + 1 мин на принятие решения о торможении
- 7) Прицельное торможение к выходному, с учетом запаса на торможение ко входному, ограничение скорости 25 км/ч за входным
- 8) Прицельное торможение к выходному, с учетом запаса на торможение к маневровому за входным, ограничение скорости 25 км/ч за входным

Рисунок 3.25 – Результаты моделирования попутного приема поездов

Проведенное моделирование с широким диапазоном входных данных является частным случаем, который позволяет оценить влияние тех или иных ограничений, сравнить схемы приема.

Рассмотрено влияние длины горловины станции на интервал попутного прибытия. Для этого была выбрана схема приема с ограничением скорости в 40 км/ч за входным светофором (рисунок 3.26). Результаты расчетов показывают, что увеличение длины горловины увеличивает интервал попутного прибытия – разница интервалов для средней горловины (500 м) и длинной (1500 м) составляет 1,5 мин. Это не означает, что при длинной горловине невозможно будет принять поезда,двигающиеся с двухблочным разграничением, интервал попутного прибытия в таком случае можно будет уменьшить за счет использования маршрутных светофоров (как правило в длинных горловинах есть маршрутные светофоры).

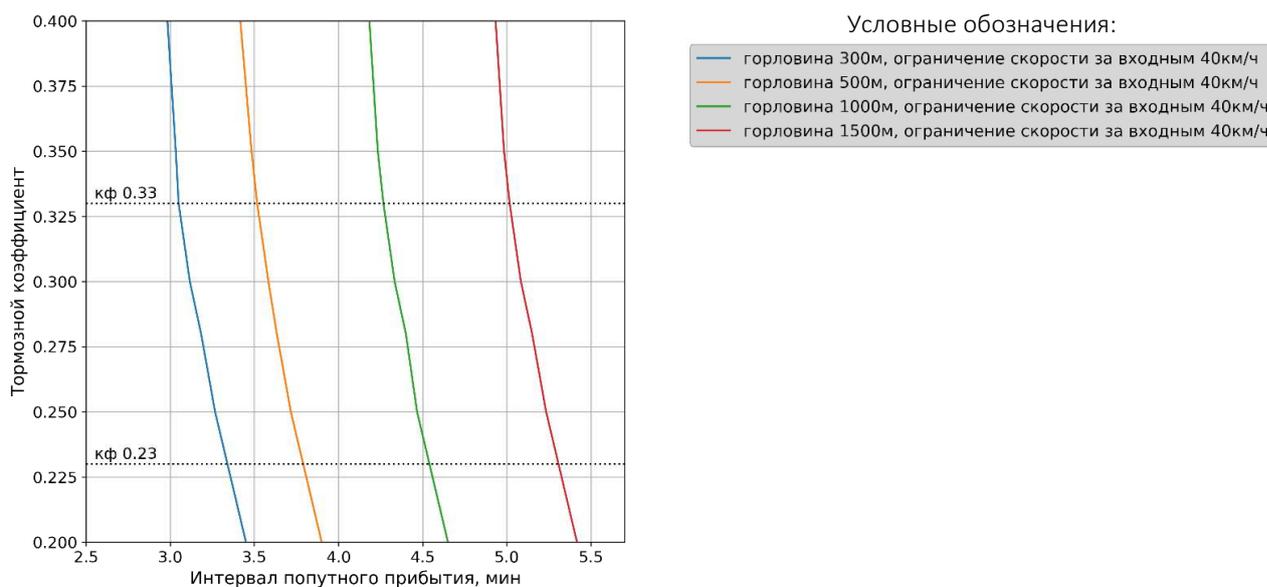


Рисунок 3.26 – Влияние длины горловины на интервал попутного прибытия

3.3.5 Соотношение между интервалом попутного отправления и прибытия

Нанесем ограничения по интервалам приема на графики, построенные в результате моделирования зависимости интервала попутного отправления, при котором поезда выходят на движение с двухблочным разграничением (движение с заданным расстоянием ВСЦ) к концу заданного отрезка пути.

Для этого определим максимальное и минимальное значение интервала попутного прибытия ограниченное максимальным и минимальным тормозным коэффициентом, для схемы приема, при которой у ведомого поезда есть запас по тормозному пути ко входному сигналу, а также дополнительная минута на принятие решения. Далее строим вертикальные прямые проходящие через эти точки на оси интервалов попутного отправления рисунков 3.14, 3.15, 3.15. Полученные графики представлены на рисунке 3.27, ограничения показаны с помощью штрихпунктирных линий красного и синего цвета.

Теперь по полученным совместным графикам (рисунок 3.27), можно оценить требования для обеспечения процесса движения поездов в виртуальной сцепке с точки зрения скорости выхода поездов на заданное расстояние ВСЦ, возможности станции по реализации отправления и приема с заданным интервалом движения поездов. Например, если поставлена задача обеспечить движение поездов в виртуальной сцепке с двухблочным разграничением и межпоездным интервалом 5 мин без строительства разгонного пути, тогда, необходимо чтобы:

- длина двух смежных блок-участков была не менее 5000 м (расстояние виртуальной сцепки на рисунке 3.27в);
- используемая сила тяги была выше 52%;
- станция и оба участка удаления (5000 м от выходного светофора поезда будут двигаться с расстоянием между ними меньшим, чем длина двухблочного разграничения) были оборудованы такими системами автоматики, алгоритмы которых не препятствовали бы разгону поездов при уменьшенном, относительно расчетного интервала попутного отправления, либо при увеличении процента используемой силы тяги до 70%, можно сократить длину участка переоборудования систем автоматики до 3000 м;
- реализуемый поездом тормозной коэффициент должен быть равен 0,33, при этом схема приема на станцию, подразумевает наличие запаса по тормозному пути ко входному сигналу с дополнительной минутой на принятие решения о начале торможения (в случае не открытия входного сигнала).

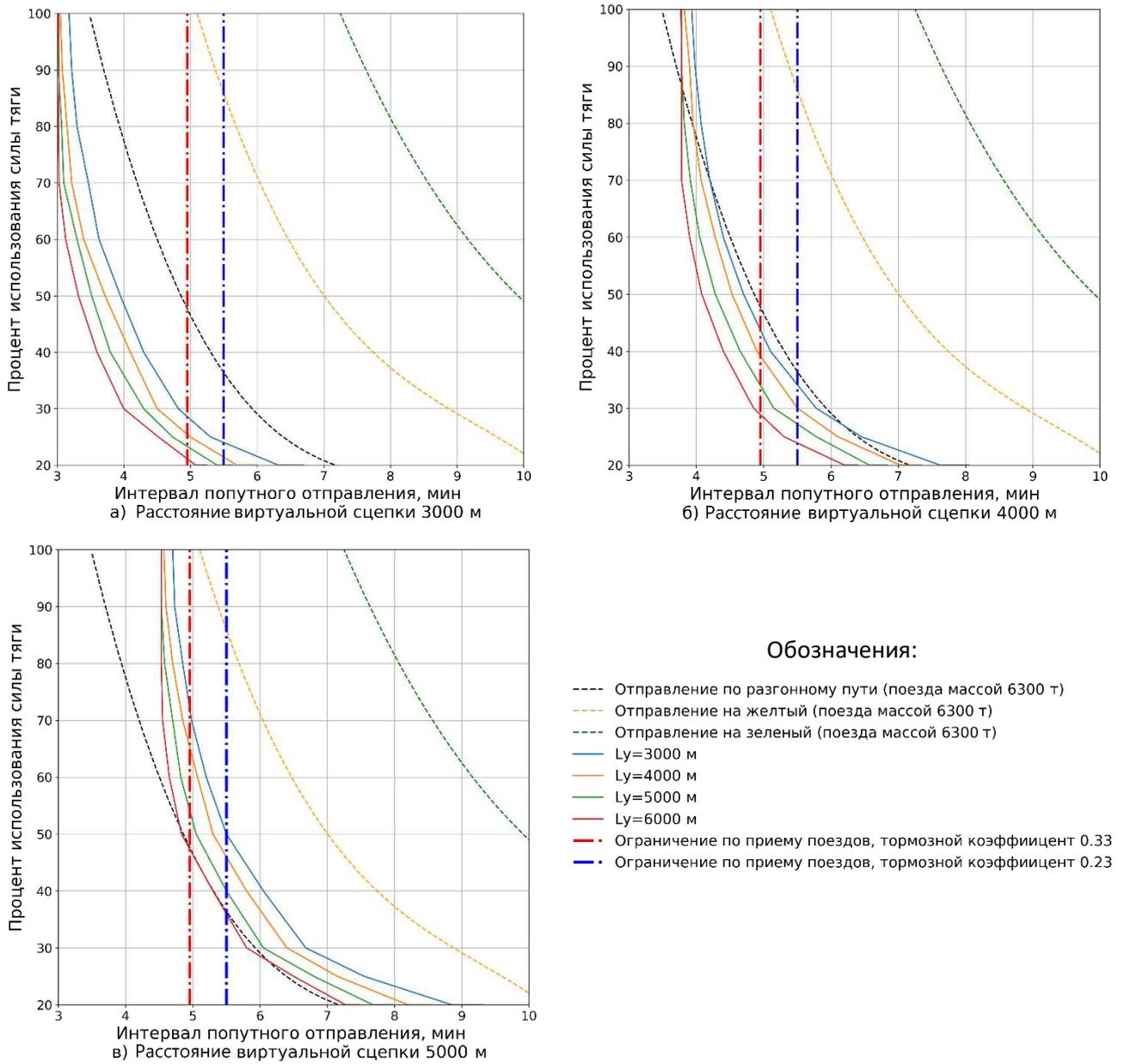


Рисунок 3.27 – Ограничения по интервалу попутного прибытия на интервал попутного отправления

Описанные требования технически реализуемы, 52% использования силы тяги, как показывает анализ записей из локомотивных устройств, является близким к медианному значению, а средняя длина одного блок-участка стремится к 2500 м, при этом движение со скоростью 80 км/ч по двум блок-участкам длиной 2500 м означает межпоездной интервал около 4 мин, а значит что при попутном отпращивании с интервалом 5 мин, фактический пространственный интервал между поездами, при движении со скоростью 80 км/ч составит 6600 м. В реальности средняя

скорость движения гораздо ниже, и возможны ситуации при которых поезда могут нагонять друг друга или убегать друг от друга, но это можно регулировать с помощью алгоритмов управления поездами в виртуальной сцепке, а описанные выше требования все равно придется обеспечить. Так, на данный момент, уровень развития систем автоведения и точности позиционирования по спутниковым системам, не позволяет отказаться от существующих напольных устройств автоматики, а они без совершенствования их работы с учетом особенностей отправления поездов в виртуальной сцепке, не позволят выполнить отправление с интервалами меньшими, чем расчетные для трехблочного разграничения движения поездов.

Только совместное обеспечение всех перечисленных условий и требований позволит организовать ритмичное движение поездов в виртуальной сцепке, без учета влияния систем электроснабжения, количества путей на станции. Важно также отметить, что при уменьшении межпоездного интервала, любое отклонения от запланированного темпа движения будет непременно сказываться на выполнении графика движения, поэтому, необходимо максимально унифицировать движение поездов в виртуальной сцепке за счет использования систем автоведения на протяжении всего маршрута, от отправления до полной остановки, поскольку анализ скоростемерных лент, и записей локомотивных систем безопасности движения показывает насколько по-разному реагируют на одинаковые поездные ситуации машинисты.

Выводы по 3 главе

Результаты исследований в третьей главе.

1. Проведено моделирование попутного отправления поездов, использующих технологию виртуальной сцепки:

– обоснована необходимость уменьшения интервала попутного отправления при использовании технологии виртуальной сцепки для повышения пропускной способности участка;

- описана концепция применения технологии виртуальной сцепки при попутном отправлении поездов для повышения пропускной способности участка;
- изучено влияние интервала попутного отправления и ускорения поездов на расстояние между попутно отправляемыми поездами;
- изучено влияние ограничений скоростей при отправлении поездов на ускорение разгона;
- представлен способ определения граничных условий попутного отправления поездов, при которых поезда выходят на движение с заданной дистанцией к концу заданного участка пути;
- представлена методика определения необходимости совершенствования алгоритмов систем автоматики или строительства разгонного пути, даны численные оценки уменьшения интервала попутного отправления при переходе на отправление с использованием виртуальной сцепки, в том числе при использовании разгонного пути;
- представлен метод определения длины разгонного пути, даны численные оценки значений длины разгонного пути для разных значений процента используемой силы тяги поездов, масс поездов и интервалов попутного отправления;
- описаны требования к станционным системам автоматики и телемеханики при попутном отправлении поездов в виртуальной сцепке, реализация которых позволит обеспечить попутное отправление поездов с интервалом меньшим, чем расчетный при трехблочном разграничении движения поездов.

2. Проведено моделирование попутного прибытия поездов, использующих технологию виртуальной сцепки:

- определены зависимости интервала попутного прибытия от ускорений торможения, уклона профиля, длины горловины и схемы приема поездов на станцию;
- определено соотношение между интервалом попутного прибытия и отправления, при котором не возникает задержки ведомых поездов из-за остановки ведущего на станции;
- определены требования к станционным системам автоматики при попутном прибытии поездов в виртуальной сцепке.

4 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКИ

4.1 Постановка задачи разработки технических и технологических решений

Существующие станционные интервалы попутного отправления и места установки проходных светофоров автоблокировок рассчитаны исходя из необходимости обеспечения движения поездов с трехблочным интервалом разграничения [183–185]. Применение такого разграничения позволяет, при исправном оборудовании и отсутствии технологических задержек, двигаться поездам с установленной скоростью на зеленые сигналы проходных светофоров. При этом, на всем пути следования, расстояние между поездами должно быть не меньше, чем суммарная длина трех блок-участков, находящихся между поездами. Требования к минимальной длине одного блок-участка основано на необходимости обеспечения торможения поезда в пределах одного блок-участка с максимальной скорости до полной остановки. Можно сказать, что движение поездов с трехблочным разграничением с установленной максимальной скоростью происходит при наличии трехкратного запаса по тормозному пути. Уменьшение этого запаса не предусматривается существующими нормативными документами и как следствие графиками движения поездов. Как показал анализ существующих поездов, по записям из локомотивных устройств безопасности, на основе массива данных подготовленного С.В. Бушуевым [180], даже при кратковременном появлении желтого сигнала на проходом или локомотивном светофоре машинисты часто сбрасывают скорость (рисунок 4.1). Это происходит потому, что машинист не знает достоверно причину возникновения желтого сигнала (впередиидущий поезд выполнил вынужденную остановку на перегоне или просто замедлил свое движение).

График изменения скорости от расстояния после выезда на "Ж"

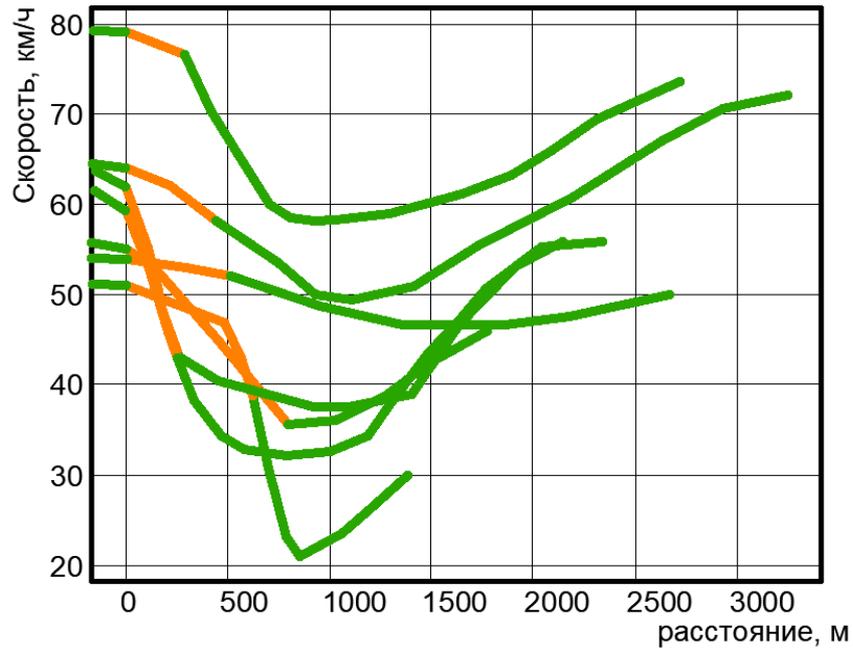
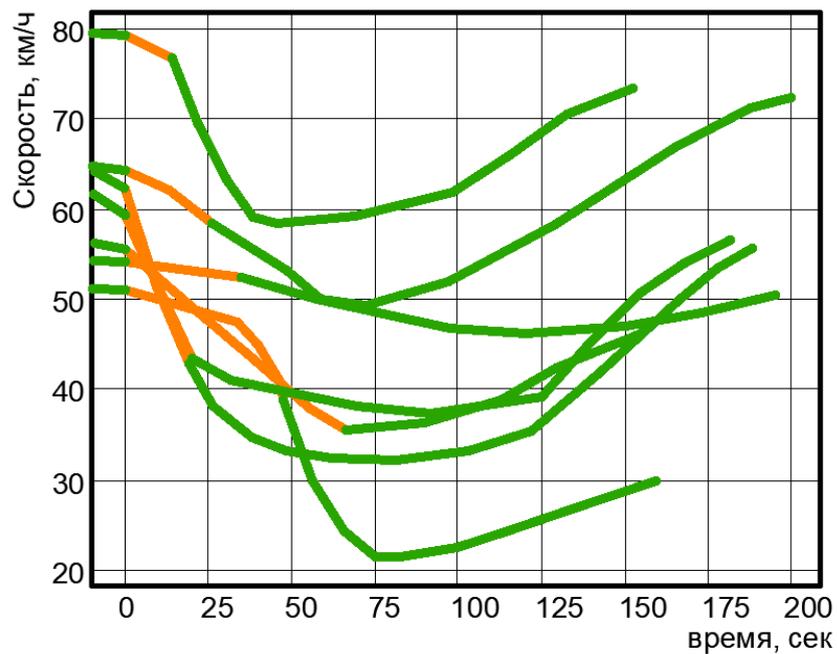


График изменения скорости от времени после выезда на "Ж"



Обозначения:

- - получение кода Ж на локомотив
- - получение кода З на локомотив

Рисунок 4.1 – Снижение скорости поезда при кратковременном получении кода «Ж»

Минимальное возможное расстояние между поездами при существующих системах автоматики равно сумме длины выходной горловины станции и первого

участка удаления, в таком случае отправление поезда происходит на желтый сигнал выходного светофора. Отправление на желтый сигнал выходного светофора не запрещается существующими нормативными документами, однако существуют станции, на которых есть локальный запрет на отправление по желтому сигналу выходного светофора, это связано с ограничением видимости [11; 183]. Поскольку при отправлении грузовые поезда постепенно набирают скорость и не успевают разогнаться до максимальных скоростей в пределах участков удаления, запас по тормозному пути до хвоста впередиидущего поезда оказывается по факту еще больше, чем в ситуации равномерного движения поездов по перегону с установленной скоростью и трехблочным разграничением.

В полной мере использовать обозначенные запасы позволит координатная система интервального регулирования [35; 158] и/или технология автоведения по стандарту GoA4 [186], в значительной степени автоблокировка с плавающим блок-участком [14; 150], но эти решения требуют кардинальной замены всех систем автоматики на участке железной дороги, что не целесообразно без значительного увеличения интенсивности пассажирского движения. Частично использовать обозначенные запасы и тем самым обеспечить потребность в росте объема грузовых перевозок в большинстве случаев позволит технология виртуальной сцепки за счет перехода к двухблочному разграничению при движении по участкам с трехзначной автоблокировкой [7].

На данный момент технология виртуальной сцепки позволяет сблизить поезда при движении по перегону с установленной скоростью до двух блок-участков, т.е. использовать ранее недоступные резервы пропускной способности. При этом, для повышения пропускной способности участка необходимо сближение поездов уже на этапе отправления со станции, за счет сокращения интервала попутного отправления.

Отдельное внимание следует уделить проблеме безопасности при отказе системы автоведения (виртуальной сцепки) в процессе отправления с уменьшенным межпоездным интервалом, потому что при движении по перегону с двухблочным разграничением цепочка резервирования функции безопасности уже существует:

система автоведения – система локомотивной безопасности (САУТ, КЛУБ, БЛОК) – машинист и проходные светофоры АБ. В тоже время, существующие системы автоматики, запроектированные для обеспечения движения поездов с трехблочным разграничением не позволят отправить ведомый поезд с требуемым интервалом. Поэтому требуется разработать технологические решения по отправлению ВСЦ поездов при уменьшенном, относительно запроектированного на участке, интервале попутного отправления, на основании которых будут определены и реализованы требования к техническим решениям систем электрической централизации и автоматической блокировки.

Предварительно, по кривым скорости расчетных поездов в виртуальной сцепке, необходимо рассчитать момент выхода поездов на движение с заданным межпоездным интервалом, тем самым определить эффективность существующих тяговых возможностей по реализации заданного межпоездного интервала, а также целесообразность будущих изменений систем автоматики

4.2 Технология отправления поездов в виртуальной сцепке

Перед отправлением поездов по технологии виртуальной сцепки, между локомотивами устанавливается связь по радиоканалу, настраивается локомотивное оборудование в соответствии с регламентом виртуальной сцепки. Далее происходит отправление ведущего поезда в режиме автоведения так же в соответствии с общепринятым порядком отправления на станции. Принципиальные отличия возникают при отправлении ведомого поезда (ведомых поездов). Для обеспечения требуемого интервала важна точность момента отправления и соблюдение ведомым поездом расчетной кривой скорости, что может быть обеспечено только в режиме автоведения.

Из-за недостаточного ускорения разгона грузовых поездов, отправление ведомого поезда будет происходить в момент времени, когда хвост ведущего поезда еще находится на станции. Системы автоматики не должны препятствовать набору

скорости ведомым поездом, но при этом должны по-прежнему обеспечить достаточный для торможения безопасный интервал между ВСЦ поездами и автоматическое торможение ведомого поезда в случае нештатных ситуаций. Это невозможно без пересмотра технических решений станционной системы автоматики и алгоритмов установки и кодирования маршрута отправления. Важно обеспечить передачу на ведомый локомотив кодов АЛС, позволяющих выполнять набор скорости, в случае исправной работы устройств, а также передачу кода «КЖ» требующего от машиниста выполнения полной остановки, в случае возникновения нештатной ситуации (отказ напольных устройств или системы автоведения). При отказе или сбое систем виртуальной сцепки машинисту ведомого поезда неизвестна координата точки остановки поезда, поэтому возникает необходимость предусмотреть установку дополнительных светофоров, информирующих машиниста о свободности впередилежащего участка пути, и обозначающих места остановки поезда. Количество и места установки дополнительных светофоров определяются исходя из требуемого межпоездного интервала при двухблочном разграничении. Расстановка дополнительных светофоров до той точки пути, в которой между поездами становится более двух свободных блок-участков существующей автоблокировки. При этом, если по результатам расчетов требуется установка дополнительных светофоров за границами второго участка удаления, предлагается рассматривать вариант изменения всей системы автоблокировки на перегоне, поскольку это означает, что поезда заданной массы и длины не могут выйти на движение с двухблочным разграничением достаточно быстро (в начале перегона).

Важно, чтобы работа дополнительных светофоров не оказывала влияния на безопасность движения поездов, не использующих технологии виртуальной сцепки.

Решением обозначенных вопросов может стать специальный режим работы ЭЦ станции «отправление поездов в виртуальной сцепке», при активации которого, устройства автоматики и телемеханики на станции и участках удаления будут функционировать по специальным алгоритмам, учитывающими особенности работы с поездами, отправляющимися в виртуальной сцепке, до тех пор, пока поезда

в виртуальной сцепке не покинут переоборудованные под отправление ВСЦ поездов участки удаления.

4.3 Технические решения по отправлению поездов в виртуальной сцепке

4.3.1 Специальный режим работы станции «Отправление поездов в виртуальной сцепке»

Включение режима должно осуществляться по 1 классу надежности с проверкой условий: отсутствие маршрутов приема или сквозного пропуска, наличие двух и более поездов на приемоотправочных путях. После доклада машинистов о готовности к отправлению в режиме ВСЦ дежурный по станции включает специальный режим ЭЦ и задает несколько маршрутов отправления в требуемой последовательности, которые накапливаются системой ЭЦ и начинают последовательно реализовываться по мере отправления ВСЦ поездов. До завершения реализации всех накопленных маршрутов возможность установки новых враждебных маршрутов должна быть исключена. После реализации всех накопленных маршрутов специальный режим отменяется автоматически.

При этом маршруты отправления поездов заканчиваются у последнего дополнительного светофора. Часть путевых секций будут общими для всех маршрутов. Поэтому после установки маршрутов, выходные светофоры открываются в той последовательности, в которой были заданы маршруты, по мере освобождения хвостом уходящего поезда общих секций пути, а дополнительные светофоры включаются сразу и работают в режиме двузначных проходных сигнальных точек автоблокировки. После открытия первого выходного светофора разрешается движение ведущего поезда только в режиме автоведения. Машинист ведущего поезда контролирует движение в режиме автоведения, руководствуясь показаниями локомотивного и проходных светофоров, работа которых при отправлении ведущего поезда не отличается от работы в обычном режиме. Отправление ведомых поездов происходит только в режиме автоведения, после выдержки заданного в алгоритмах

автоведения ВСЦ, интервала попутного отправления, соответствующего межпоездному интервалу в пакете ВСЦ поездов, при этом машинист контролирует движение поезда по сигналам локомотивных, дополнительных и проходных светофоров. Своевременное переключение дополнительных светофоров является дополнительным источником информации для машиниста ведомого поезда, информирующим о движении ведущего поезда. После реализации всех накопленных маршрутов, выключается специальный режим ЭЦ, гаснут дополнительные светофоры.

По мере освобождения хвостом ведущего поезда путевых секций происходит перевод общих стрелок в маршрутах отправления ведущего и ведомого, и замыкание их в маршруте отправления ведомого поезда, по принципу «накопления маршрутов» [32]. Применение данного метода установки маршрута позволяет уменьшить время подготовки маршрута, и необходимо в связи с тем, что отправление ведомого поезда происходит в момент, когда маршрут отправления ведущего поезда не разомкнулся до конца, т.к. хвост поезда еще находится на станции.

Поскольку в момент отправления хвост ведущего поезда находится на станции, потребуется также изменение принципов кодирования маршрута отправления ведомого поезда. Необходима реализация кодирования секций в маршруте отправления по принципу схожему с применением «подвижных блок-участков». При этом первая рельсовая цепь за хвостом ведущего поезда кодируется кодом «КЖ», а все последующие навстречу голове ведомого поезда кодируются кодом «Ж». При таком подходе не требуется значительное увеличение числа дополнительных светофоров, функционирующих только в специальном режиме «Отправление поездов в виртуальной сцепке», но следует удостовериться, что длин существующих участков достаточно для того, чтобы машинист ведомого поезда мог отреагировать на изменение кодирования и выполнить полную остановку поезда к дополнительному светофору в случае получения кода «КЖ» на локомотивном светофоре.

После того, как хвост последнего ведомого поезда освободит участки удаления, происходит автоматическое выключение специального режима функционирования станции «Отправление поездов в виртуальной сцепке» и возвращение схем управления объектами автоматики в исходное состояние.

4.3.2 Техническая реализация предлагаемых решений

Отталкиваясь от описанных принципов функционирования электрической централизации в режиме «Отправление поездов в виртуальной сцепке» определена техническая структура предлагаемых решений (рисунок 4.2). Новые дополнительные светофоры (отмечены красным на рисунке 4.2) устанавливаются по кривой скорости расчетного поезда, используя интервалы времени для движения поездов с двухблочным разграничением.

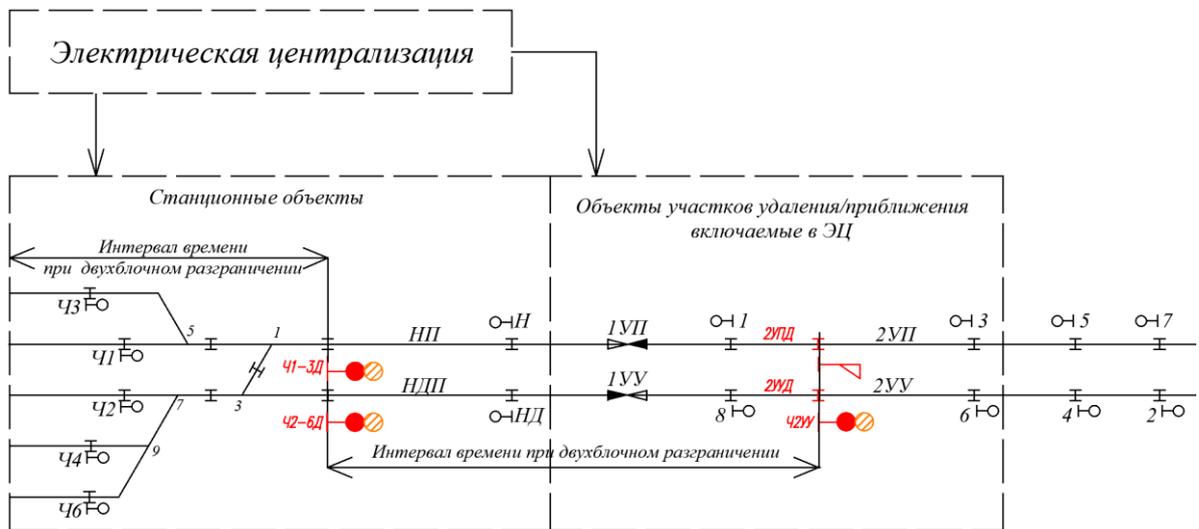


Рисунок 4.2 – Техническая структура предлагаемых решений

Точки установки новых дополнительных светофоров могут образовывать новые участки путей. Количество новых дополнительных светофоров зависит от динамических свойств расчетных поездов. Новые дополнительные светофоры требуется устанавливать до тех пор, пока между попутно следующими поездами в виртуальной сцепке не будет располагаться два свободных блок-участка (т.е. пока поезда не выйдут на движение с двухблочным разграничением). При этом, если для выхода поездов на движение с двухблочным разграничением недостаточно горловины станции и двух участков удаления, целесообразно будет рассмотреть вариант модернизации всей автоблокировки перегона, например, за счет сокращения длин блок-участков, при расстановке проходных светофоров по тормозным путям или

оборудовании участка системой интервального регулирования с подвижными блок-участками.

На представленной схеме (рисунок 4.2) показан пример, при котором требуется установка одного дополнительного светофора в горловине станции (светофор Ч2-6Д) и одного на втором участке удаления (светофор Ч2УУ) для отправления поездов в виртуальной сцепке по правильному пути двухпутного перегона, а также одного дополнительного светофора в горловине станции (светофор Ч1-3Д) и знака «граница блок-участка» на втором участке удаления для отправления на неправильный путь двухпутного перегона.

Поскольку для ведомых поездов требуется реализация специального алгоритма кодирования секций и работы дополнительных светофоров, часть оборудования перегона необходимо включить в электрическую централизацию. На представленной схеме (рисунок 4.2) показано включение в ЭЦ оборудования первого и второго участков удаления, т.е. в данном примере полагается, что ускорения поездов ВСЦ достаточно, чтобы при достижении головой ведомого поезда светофора Ч2УУ, расстояние до хвоста ведущего поезда было равно интервалу двухблочного разграничения движения поездов.

Известные утвержденные технические решения по использованию групповых выходных светофоров [187] не являются заменой предлагаемым дополнительным светофорам, поскольку отличается их назначение. Групповые выходные светофоры устанавливаются в двух основных случаях:

- на границе управления маневрового района и поста электрической централизации;
- с коротких путей, при отсутствии маршрутов приема на эти пути.

В отличие от групповых выходных светофоров, основное назначение дополнительных светофоров – сокращение интервала попутного отправления.

4.3.3 Методика определения мест установки дополнительных светофоров

Для того, чтобы определить места установки дополнительных светофоров необходимо модифицировать известную методику расстановки проходных сигналов по интервалам времени при проектировании автоблокировки [185].

Методика определения мест установки дополнительных светофоров сводится к выполнению следующих шагов:

1. Необходимо определить наибольшее время хода по двум смежным блок-участкам существующего участка, на котором будет внедряться технология виртуальной сцепки. Полученное значение является временным интервалом двухблочного разграничения поездов $I_{2\text{бл}}$.

2. На кривой скорости расчетного поезда откладывается полученный интервал времени $I_{2\text{бл}}$ с помощью временных засечек.

3. От полученных засечек в сторону станции откладывается половина длины расчетного поезда. Данные точки будут обозначать места установки дополнительных светофоров (первый светофор первой серии).

4. От точек установки светофоров в сторону станции откладывается половина длины расчетного поезда. Далее от этих точек снова откладывается полученный по пункту 2 интервал двухблочного разграничения. Далее повторяется пункт 3, полученные точки обозначают места установки дополнительных светофоров (второй светофор первой серии).

Продолжается расстановка дополнительных светофоров до точки пути, в которой расстояние между поездами будет большим, чем два свободных блок-участка существующей автоблокировки. Однако, как было отмечено ранее, если возникает потребность в установке более двух дополнительных светофоров, то эффективность применения данных технических решений для заданного в тяговом расчете типа поездов вызывает сомнение, необходимо проверить рациональность выбора тяги (локомотива) для заданной массы поезда.

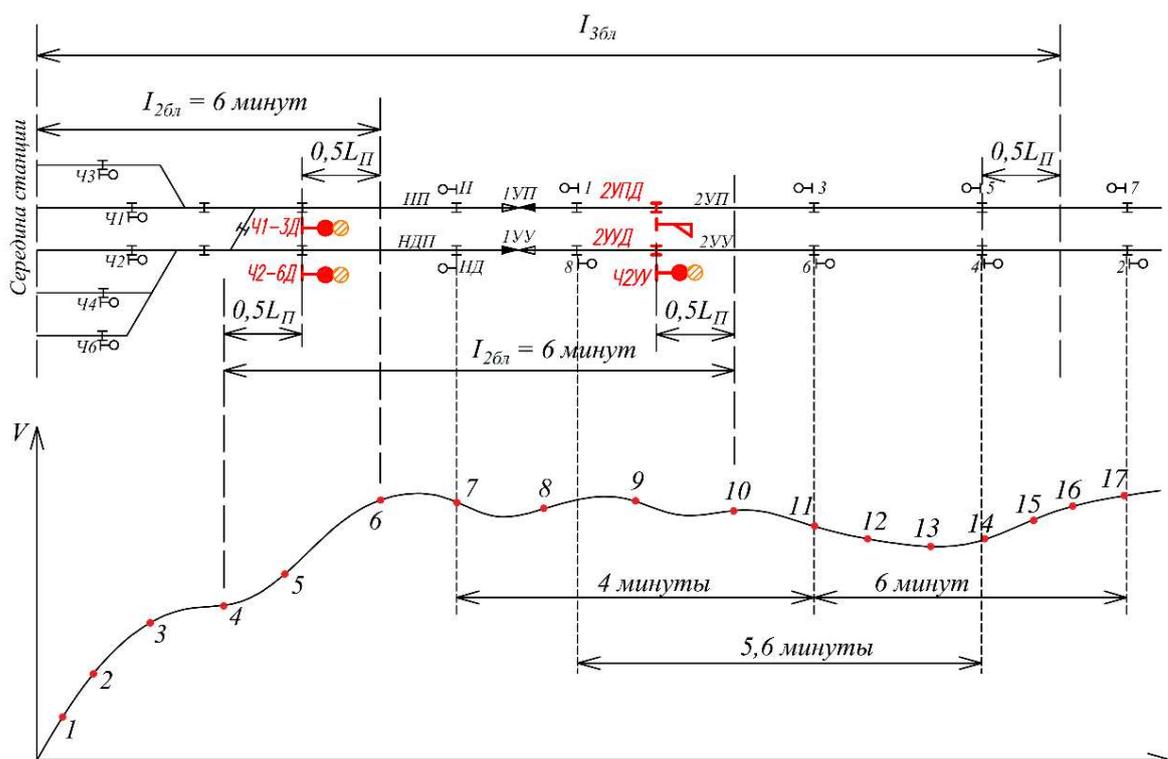
Установка дополнительных светофоров второй и третьей серии не требуется, т.к. безопасность движения обеспечивается автоведением технологии виртуальной

сцепки, резервируемой специальным алгоритмом кодирования маршрутов отправления ведомых поездов.

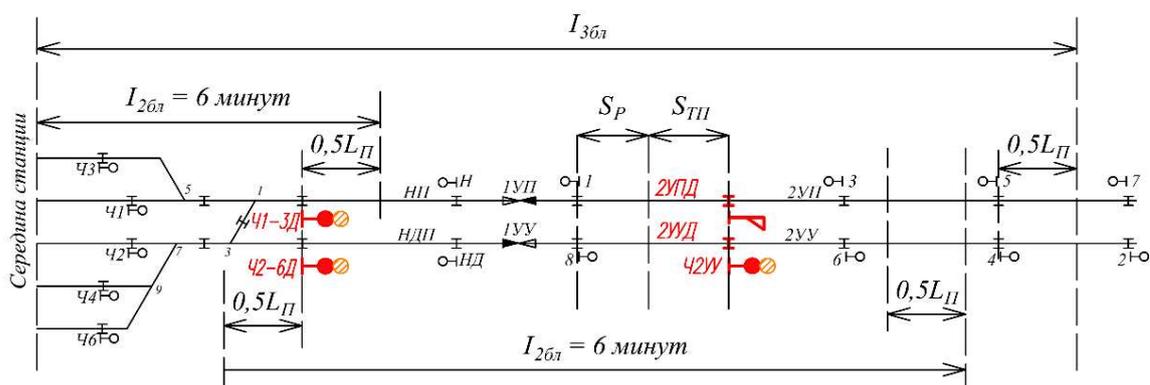
Схематический пример расстановки дополнительных светофоров представлен на рисунке 4.3а. Наибольшим временем движения по двум смежным блок-участкам (между проходными светофорами №6 и №2) стал интервал в 6 мин, именно его и необходимо использовать для определения мест установки дополнительных светофоров. Уменьшение данного интервала нецелесообразно, поскольку, поезда начнут нагонять друг друга на перегоне. В данном примере достаточно установки двух дополнительных светофоров первой серии для того, чтобы обеспечить безопасный разгон поездов в виртуальной сцепке и набора ими дистанции, соответствующей двухблочному разграничению к концу второго участка удаления.

Возможна ситуация, при которой применяя описанную методику, установка третьего дополнительного светофора первой серии или второй светофор первой серии окажется за пределами второго участка удаления, это может быть неоправданно с точки зрения затрат на реконструкцию. В таком случае можно рассмотреть вариант установки второго (третьего) дополнительного светофора используя методику расстановки сигналов по тормозным путям расчетного поезда [23].

На рисунке 4.3б представлен пример установки второго дополнительного светофора по тормозному пути. Установка первого дополнительного светофора (Ч1-3Д, Ч2-6Д) производится по описанной методике с интервалом двухблочного разграничения равным 6 мин. Место установки второго дополнительного светофора по описанной методике получается между 6 и 4 проходными светофорами, то есть за границей второго блок-участка. В таком случае необходимо установить второй дополнительный светофор (Ч2УУ) на втором участке удаления на расстоянии от светофора 8 равному сумме пройденного пути поездом S_p за время смены кодов на локомотивном светофоре (3 с для АЛС-ЕН и 12 с для АЛСН), реакции машиниста (5 с) на смену кодов и тормозного пути поезда $S_{тп}$.



а) установка первого и второго светофора I серии по интервалам времени



б) установка второго светофора I серии по тормозному пути

Условные обозначения:

$I_{36л}$ - интервал времени при трехблочном разграничении поездов

$I_{26л}$ - интервал времени при двухблочном разграничении поездов виртуальной сцепке

$0,5L_{П}$ - половина длины поезда

S_P - пройденный путь поезда за время реакции машиниста и восприятия смены кодов на локомотиве

$S_{ТП}$ - тормозной путь поезда

Рисунок 4.3 – Расстановка дополнительных светофоров

После того, как были определены места установки дополнительных светофоров, необходимо произвести проверку того, что длин существующих и новых изолированных участков пути достаточно для того, чтобы отправляющийся со станции ведомый поезд мог выполнить торможение.

4.3.4 Пример оборудования промежуточной станции дополнительными светофорами

Рассмотрим примеры оборудования станций дополнительными светофорами для реализации отправления с интервалом 6 мин при короткой горловине и небольшом числе приемо-отправочных путей (промежуточная станция до 10 стрелок) и при длинной горловине с большим числом приемо-отправочных путей (участковая станция 30-50 стрелок). Принципы расстановки дополнительных светофоров на данных станциях будут одинаковые, но из-за разницы в длине горловин возможны различные варианты установки дополнительных светофоров в створе с существующими поездными или маневровыми светофорами.

На рисунке 4.4 представлена часть схематического плана реальной станции, на которой предложено применение дополнительных светофоров, установленных по описанной методике (п. 4.3.3) для интервала попутного отправления (и интервала двухблочного разграничения) равного 6 мин.

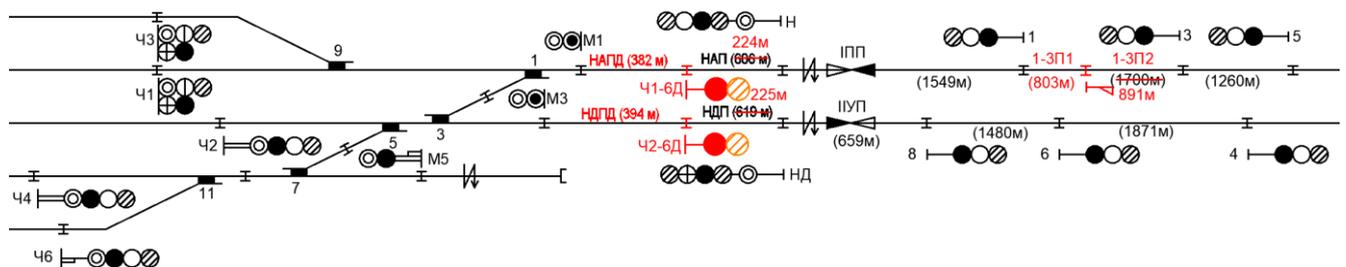


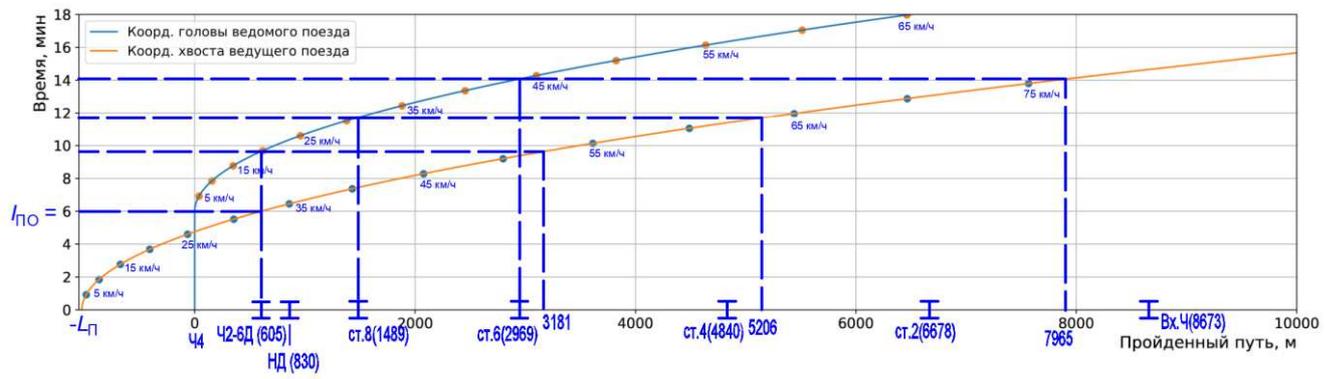
Рисунок 4.4 – Оборудование промежуточной станции дополнительными светофорами

При отправлении на правильный путь перегона, длины существующих изолированных участков пути таковы, что достаточно установки только одного дополнительного светофора (Ч2-6Д) чтобы отправляемые со станции поезда в виртуальной сцепке безопасно выходили на расстояние ВСЦ при двухблочном разграничении к моменту достижения головой ведомого поезда ординаты установки дополни-

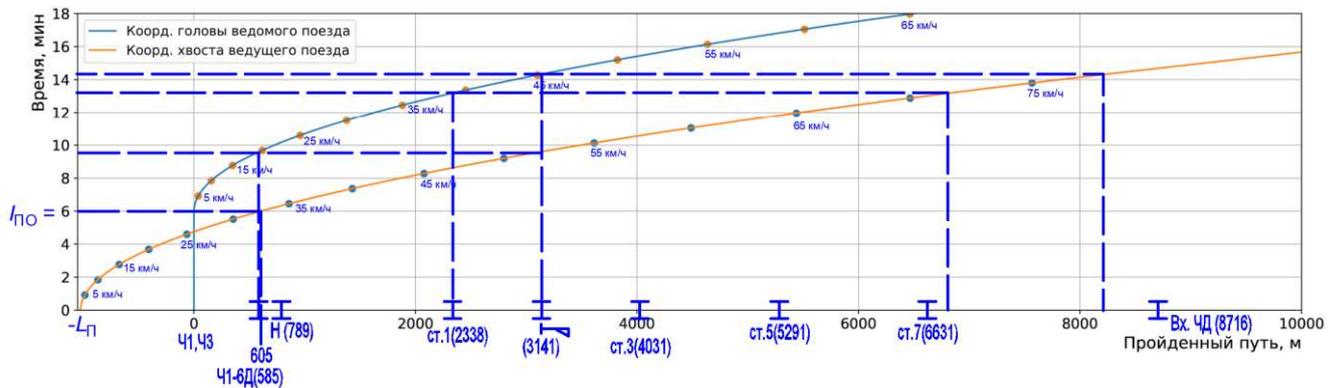
тельного светофора в горловине станции (Ч2-6Д). При отправлении на неправильный путь перегона, к моменту достижения головой ведомого поезда ординаты установки дополнительного светофора Ч1-6Д поезда не выходят на движение с двухблочным разграничением, поэтому требуется разделение существующего второго участка приближения на две рельсовых цепи. Точка разделения второго участка приближения определяется как точка установки дополнительного светофора по методике описанной в п. 4.2.1. Поскольку отправление происходит на неправильный путь, вместо дополнительного светофора на втором участке приближения можно использовать знак «граница блок-участка», который будет обозначать место остановки ведомого поезда в случае остановки впередиидущего ведущего поезда или при возникновении неполадок с аппаратурой виртуальной сцепки. Дополнительные светофоры (Ч1-6Д и Ч2-6Д) разделяют существующие бесстрелочные участки за входными светофорами на две части (НАП и НАПД, НДП и НДПД), при этом работа данных рельсовых цепей как индивидуальных осуществляется только в рамках активированного режима «Отправление поездов в виртуальной сцепке», во всех остальных зависимостях электрической централизации контактами путевых реле этих рельсовых цепей включается общий повторитель (НАП и НАПД соответственно), работа которого будет аналогична работе одного путевого реле участка до его разделения. Аналогичная ситуация с разделением второго участка приближения на две рельсовых цепи, каждая из которых работает индивидуально при отправлении поездов в виртуальной сцепке и совместно при штатной работе автоблокировки.

Для оценки расстояния между головой ведомого и хвостом ведущего поездов построены расчетные графики зависимости пройденного пути от времени (рисунок 4.5). На ось пройденного пути нанесены точки, соответствующие существующим границам рельсовых цепей и блок-участков, а также новые образованные после установки дополнительных светофоров. Для ведущего поезда отображается изменение координаты хвоста, для ведомого – координаты головы. На оси пройденного пути с помощью нуля обозначена координата выходного светофора ведомого по-

езда, совпадающая с головой ведомого поезда, а координата хвоста ведущего поезда будет обозначать длину ведущего поезда ($-L_{П}$). На полученные графики изменения координат нанесены точки, рядом с которыми указана текущая скорость поезда, с шагом 5 км/ч. Таким образом можно оценить расстояние между поездами в разные моменты времени, при этом узнать скорость поездов и количество свободных рельсовых цепей (или блок участков) между головой ведомого и хвостом ведущего поезда. На рисунке 4.5а представлены графики при отправлении на правильный путь перегона, на рисунке 4.5б – на неправильный.



а) отправление на правильный путь перегона



б) отправление на неправильный путь перегона

Рисунок 4.5 – Изменение пройденного пути при отправлении поездов в виртуальной сцепке с промежуточной станции

Так, например, при достижении головой ведомого поезда ординаты, в которой установлен дополнительный светофор Ч2-6Д, хвост ведущего поезда будет находиться на третьем участке удаления (за проходным светофором №6), скорость

ведомого при этом составляет 20 км/ч, а скорость ведущего более 50 км/ч. Из этого можно сделать вывод, что при дальнейшем ускоренном движении, расстояние между поездами будет увеличиваться, поскольку разница скоростей все еще велика, при этом в данный момент времени между поездами больше двух блок-участков, это означает, что поезда вышли на движение с двухблочным разграничением.

4.3.5 Пример оборудования участковой станции дополнительными светофорами

При оборудовании участковой станции с длинной горловиной и сложным путевым развитием удалось расположить дополнительные светофоры в горловине станции с существующими маневровыми (рисунок 4.6). Данный вариант имеет преимущество с точки зрения проведения строительно-монтажных работ, а также при внесении изменений в схемы электрической централизации – не придется создавать новые рельсовые цепи.

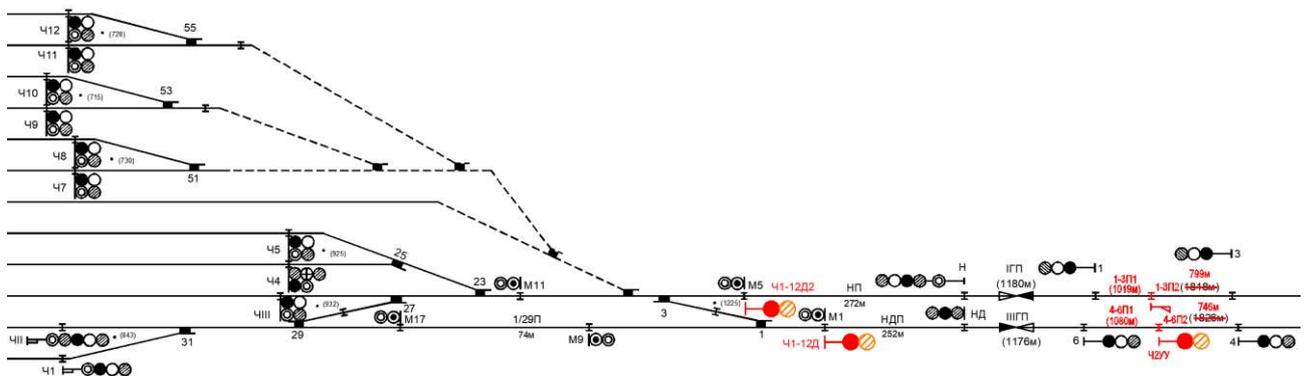
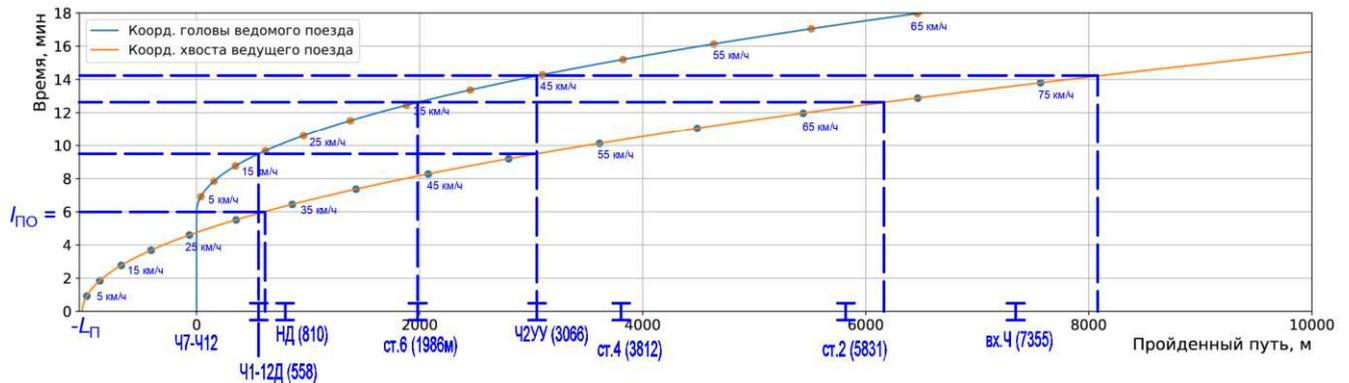


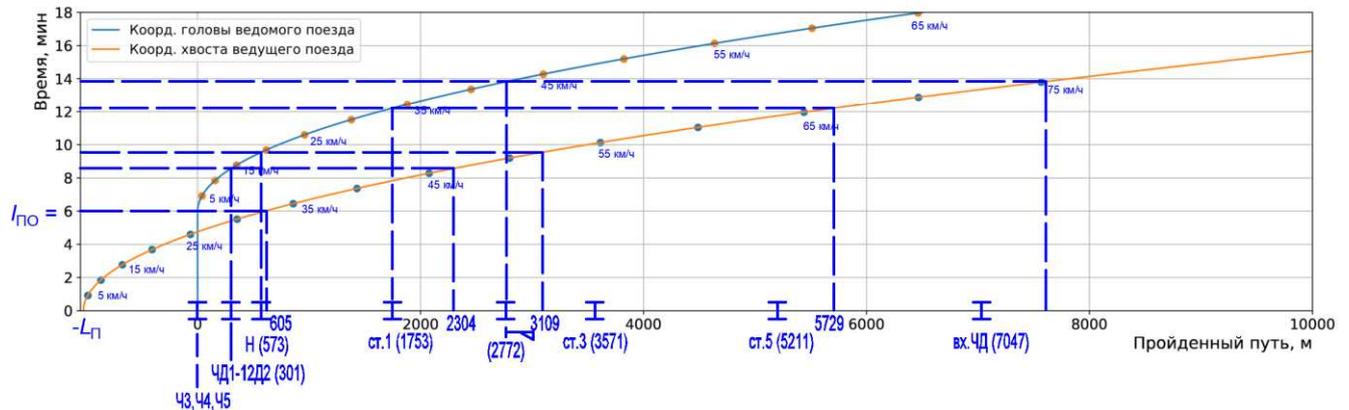
Рисунок 4.6 – Оборудование участковой станции дополнительными светофорами

Длины блок-участков, прилегающих к данной участковой станции таковы, что требуется установка дополнительного светофора на втором участке удаления, при отправлении на правильный путь перегона и знака «граница блок-участка» при отправлении на неправильный путь перегона.

Графики изменения координаты головы и хвоста построены и для случая отправления с участковой стацией (рисунок 4.7).



а) отправление на правильный путь перегона



б) отправление на неправильный путь перегона

Рисунок 4.7 – Изменение пройденного пути при отпуске поездов в виртуальной сцепке с участковой станцией

По полученным графикам можно оценивать изменение расстояния между поездами при отпуске со станции. Временной интервал между поездами сохраняется равным 6 мин, а расстояние увеличивается до тех пор, пока оба поезда не будут двигаться с максимальной установленной скоростью. По графикам на рисунках 4.5 и 4.7 видно, что в каждый момент времени между поездами располагается не менее двух свободных рельсовых цепей, а значит возможно реализовать алгоритмы работы дополнительных светофоров и кодирования маршрута ведомого поезда.

4.3.6 Алгоритм работы светофоров

Представить алгоритм работы двух дополнительных светофоров одного в горловине станции и одного на втором участке удаления, в режиме «Отправление поездов в виртуальной сцепке» можно в виде сети Петри, двудольного ориентированного графа (рисунок 4.8). Аппарат сетей Петри используется для моделирования различных систем, в том числе и железнодорожных, имеющих параллельные процессы, так в работах [188; 189] описывается построение моделей железнодорожных участков, а в [190] модель оценки времени устранения неисправностей в системах железнодорожной автоматики и телемеханики.

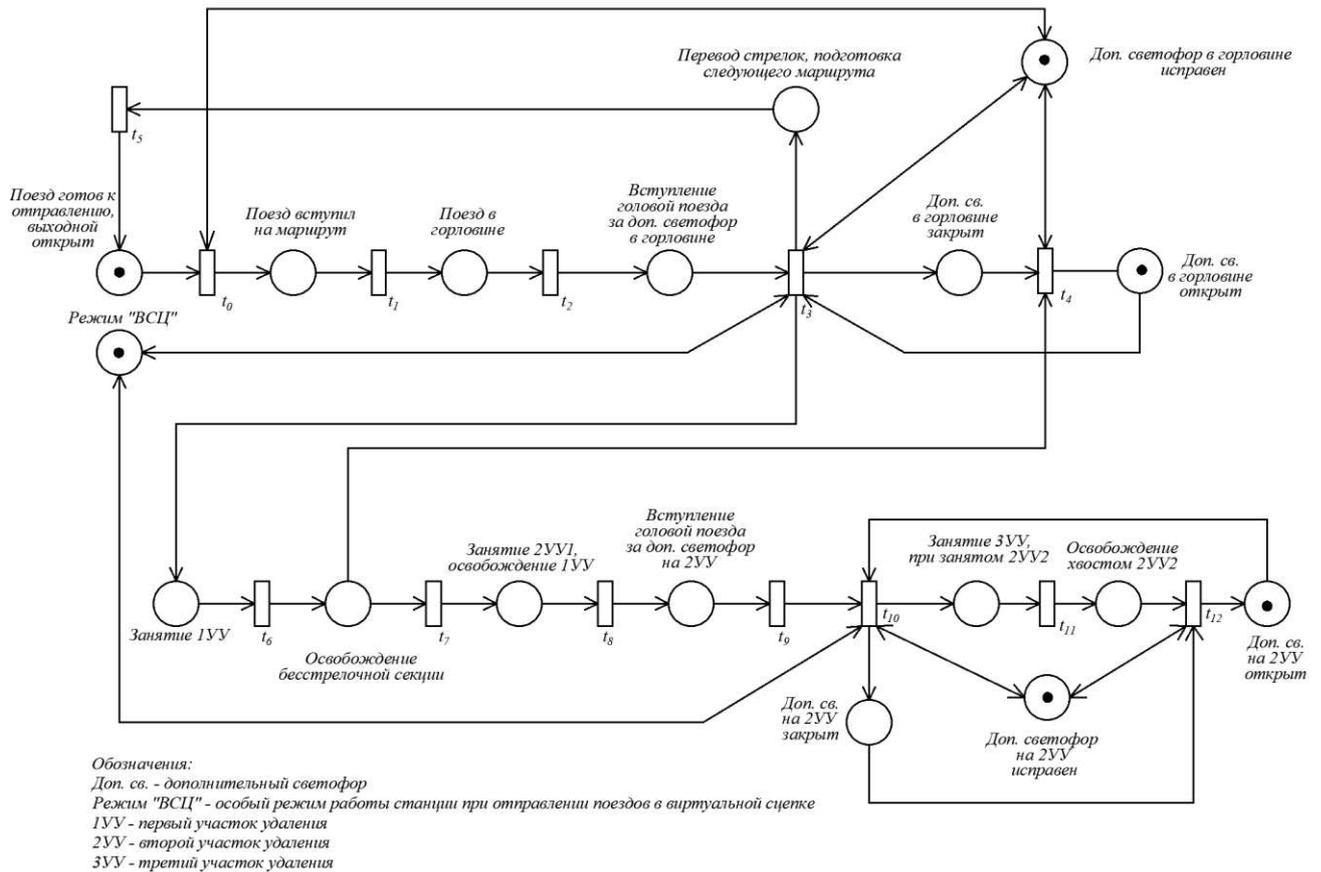


Рисунок 4.8 – Алгоритм работы светофоров

Исходное состояние сети:

– ведущий поезд находится на приемо-отправочном пути, выходной светофор открыт;

- включен режим «отправление поездов в виртуальной сцепке»;
- дополнительные светофоры включены и исправны;
- таймер, отсчитывающий интервал отправления ведомого поезда выключен.

Длительности переходов $t_0, t_1, t_2, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{11}$ описывают передвижение поезда. Длительности переходов $t_3, t_4, t_5, t_{10}, t_{12}$ соответствуют временам работы устройств автоматики при переключении светофоров и установки маршрутов.

Переход t_3 – создает параллельные процессы: движение поезда, включение красного сигнала на дополнительном светофоре в горловине станции, подготовку маршрута для следующего ведомого поезда.

Переход t_{10} – создает параллельные процессы: включение красного на дополнительном светофоре на участке удаления и движение поезда.

Начало работы сети происходит со срабатыванием перехода t_0 , первым проследует ведущий поезд, запуская цикл работы для ведомых поездов, остановка работы данной сети не предусматривается (не определено количество поездов, а также предполагается безотказная работа устройств), поскольку цель создания данной сети – отработка алгоритмов работы светофоров.

На основании предложенной сети Петри можно разрабатывать схемы увязки дополнительных светофоров с релейной, релейно-процессорной системами электрической централизации, а также программный код для микропроцессорной централизации.

4.3.6 Алгоритм кодирования

Кодирование маршрута отправления ведущего поезда осуществляется согласно существующим правилам. Кодирование секций в маршруте отправления ведомого поезда осуществляется за хвостом уходящего ведущего поезда по принципу «подвижных блок-участков». Алгоритм кодирования в виде блок-схемы представлен на рисунке 4.9.

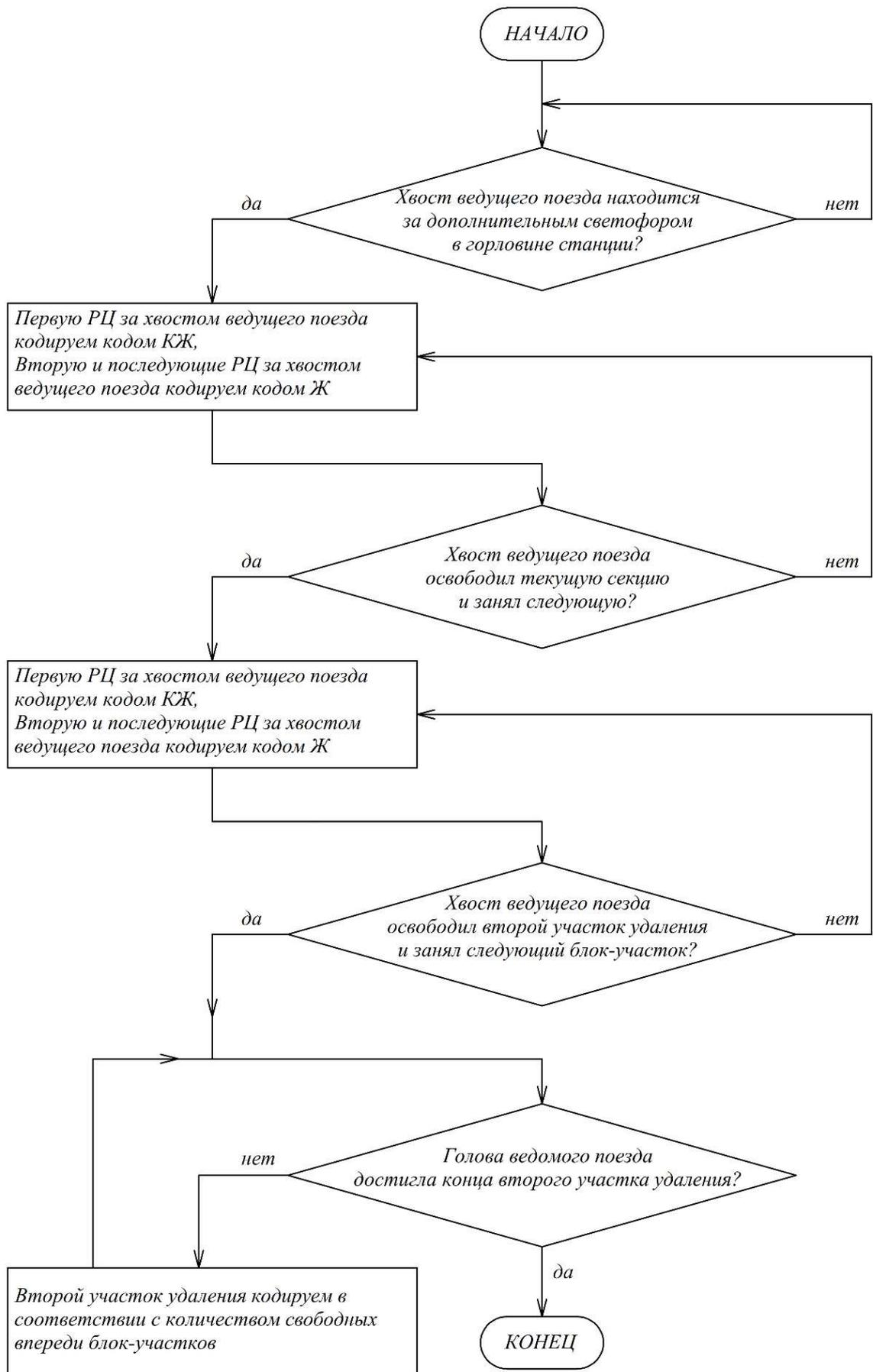


Рисунок 4.9 – Алгоритм кодирования маршрута отправления ведомого поезда

В момент открытия выходного сигнала ведомого поезда первая рельсовая цепь за хвостом ведущего кодируется кодом «КЖ», вторая и последующие кодами «Ж». В нормальном режиме, когда все функционирует исправно, на локомотив ведомого поезда поступают коды «Ж» на протяжении всего пути от выходного до точки, в которой поезда начинают ехать с двухблочным разграничением (рисунок 4.10). В случае, если не удастся организовать кодирование ведомого поезда при движении по стрелочной улице, на локомотивном светофоре будет отображаться код «Б» согласно действующим правилам кодирования (рисунок 4.11).

Если при движении поездов происходит отказ устройств автоматики или систем виртуальной сцепки, разработанный алгоритм кодирования предоставит информацию машинисту о необходимости выполнения торможения, если машинист не успевает среагировать на получение кода «КЖ», поезд должен быть остановлен локомотивными системами безопасности (БЛОК, САУТ).

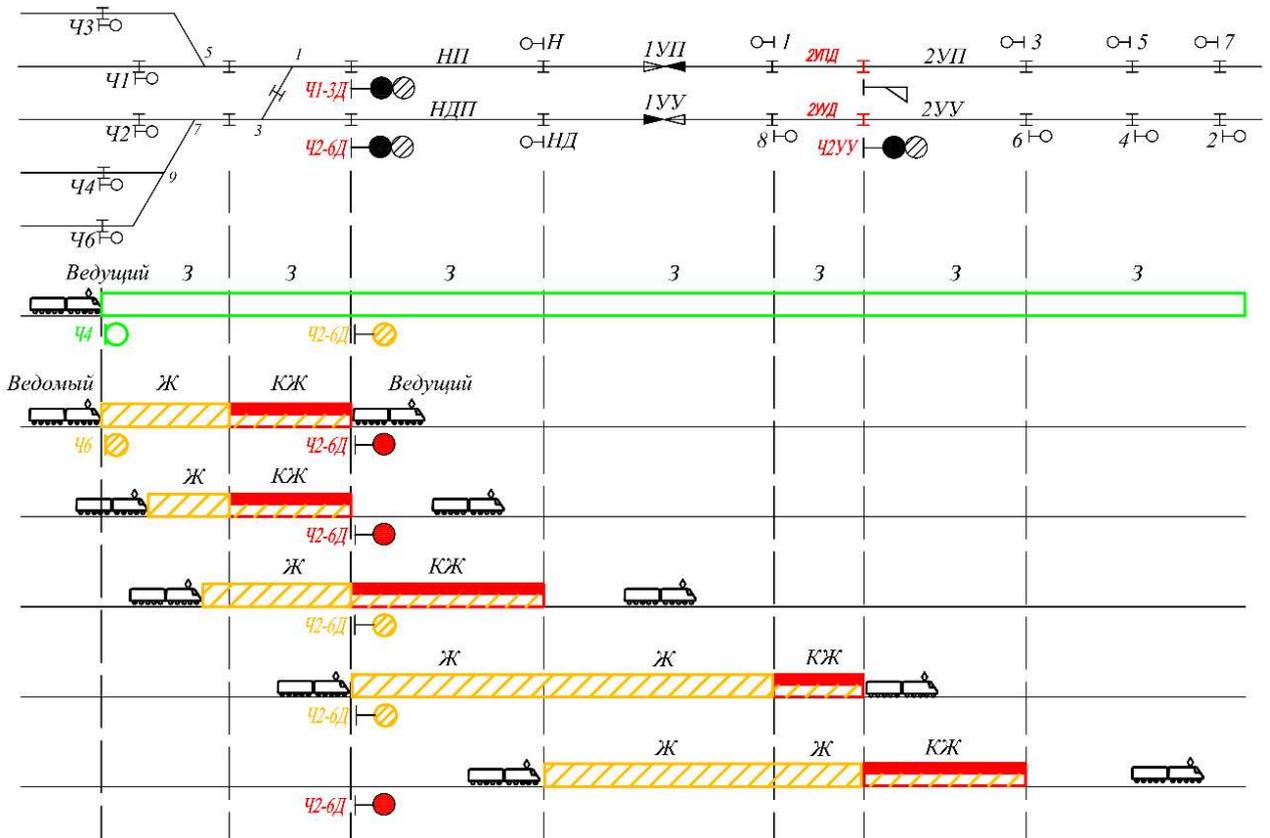


Рисунок 4.10 – Кодирование всех секций в маршруте отправления ведомого поезда

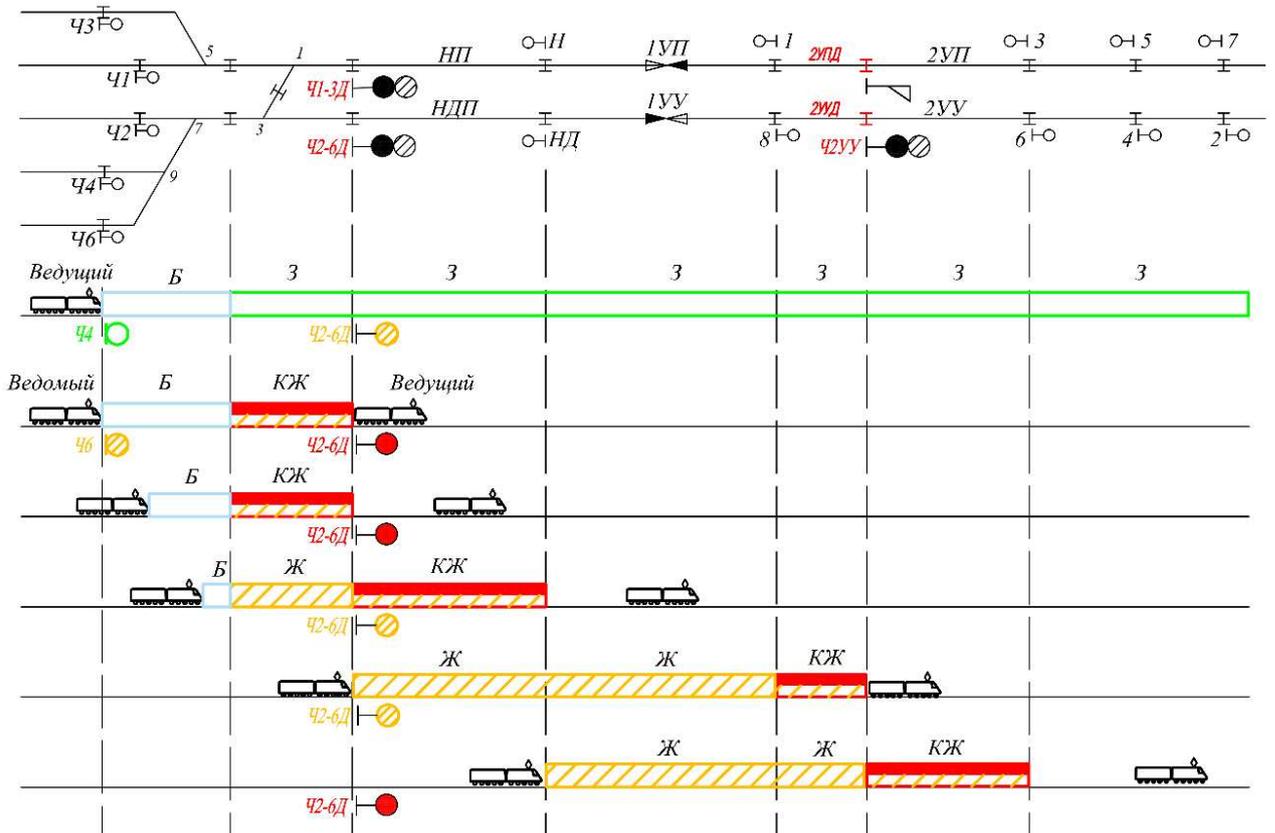


Рисунок 4.11 – Кодирование маршрута отправления при отсутствии кодов на стрелочной улице

4.3.7 Технические решения для микропроцессорной системы МПЦ-МПК

На основании представленных схемных решений, а также алгоритмов работы светофоров, кодирования и описания работы электрической централизации при отпращивании поездов в виртуальной сцепке разработаны технические решения для системы МПЦ-МПК (ЦКЖТ.665211.010ТР.Д9, приложение Б)

Структурные схемы предлагаемых технических решений, реализуемых на базе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК, разработанной ЦКЖТ ПГУПС, представлены в приложении Б. На рисунке Б.1 изображена структурная схема при установке дополнительных светофоров не дальше, чем 12 км от поста электрической централизации, данное ограничение связано с функционированием линейных цепей по медному кабелю [183]. В случае, если необходима установка

дополнительных светофоров на расстоянии большем, чем 12 км от поста электрической централизации, необходимо строительство пункта концентрации МПЦ-МПК с организацией волоконно-оптической линией связи, схема приведена на рисунке Б.2.

Схемные решения по организации кодирования секций по разработанному алгоритму (п. 4.3.6) представлены в приложении Б. Кодирование бесстрелочных (рисунок Б.3) и стрелочных (рисунок Б.4) секций пути по разработанному алгоритму можно реализовать на существующей аппаратуре, входящей в состав системы МПЦ-МПК, а именно с помощью блоков формирования рельсовых частот (БФРЧ).

Схема подключения дополнительных светофоров к контроллерам МПЦ-МПК (приложение Б, рисунок Б.5) не отличается от схем подключения поездных светофоров, алгоритм переключения дополнительных светофоров реализуется с помощью программного обеспечения МПЦ-МПК. Результаты исследований в данной главе диссертации опубликованы в [192; 193].

4.4 Повышение пропускной способности при использовании технологии виртуальной сцепки

Для оценки эффекта от повышения процента используемой силы тяги и применения описанных технических решений выполнены расчеты пропускной способности по средним показателям на участке (таблица 4.1):

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета

Среднее расстояние от выходного до первого проходного светофора	2000 м
Средняя длина второго участка удаления	2000 м
Средний процент используемой силы тяги	41 %
Средневзвешенный по длине поезда уклон	0.255
Минимальный интервал попутного отправления (ограничение по интервалу попутного прибытия)	5 мин

Межпоездной интервал на перегоне должен быть больше или равен интервалу попутного отправления и не меньше, чем интервал попутного прибытия. Определены межпоездные интервалы с учетом средних показателей участка, ограниченные интервалом попутного прибытия, учитывающим запас времени на принятие решения о начале торможения к закрытому входному светофору (1 мин) и ограничении скорости за входным сигналом 40 км/ч. В таком случае минимально возможный интервал попутного прибытия составляет 5 мин (п. 3.3).

Выполнены расчеты межпоездных интервалов с учетом указанных ограничений для поездов различной массы, с помощью методики описанной во 2 главе диссертации. Рассмотрены варианты повышения пропускной способности за счет увеличения процента используемой силы тяги локомотива (увеличение процента используемой силы тяги с 41% до 90% за счет систем автоведения), применение технических решений (в пределах двух участков удаления) для обеспечения отправления поездов в ВСЦ с интервалом, соответствующим двухблочному разграничению движения поездов, а также совместное применение технических решений и увеличение процента используемой силы тяги (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Усредненные значения межпоездных интервалов

Масса поездов	Схема	Среднее значение межпоездного интервала, мин	Среднекв. откл.	Перцентиль		
				25%	50%	75%
1	2	3	4	5	6	7
$m_{п}=2800т$	Отправление на желтый	6,25	-	-	-	-
	Повышение процента используемой силы тяги при отправлении на желтый (41-90%)	5,7	0,42	5,53	5,78	5,95
	Применение технических решений (2 участка удаления 3-5 км) - двухблочное разграничение движения поездов	4,72	0,14	4,61	4,70	4,80
	Повышение процента используемой силы тяги и применение технических решений	4,58	0,08	4,53	4,55	4,58

Окончание таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7
$m_{п}=4400т$	Отправление на желтый	7,46	-	-	-	-
	Повышение процента используемой силы тяги при отправлении на желтый (41-90%)	6,27	0,71	5,82	6,21	6,55
	Применение технических решений (2 участка удаления 3-5 км) – двухблочное разграничение движения поездов	5,26	0,19	5,16	5,25	5,35
	Повышение процента используемой силы тяги и применение технических решений	5,24	0,15	5,10	5,25	5,3
$m_{п}=6300т$	Отправление на желтый	8,9	-	-	-	-
	Повышение процента используемой силы тяги при отправлении на желтый (41-90%)	7,13	0,81	6,47	6,98	7,46
	Применение технических решений (2 участка удаления 3-5 км) – двухблочное разграничение движения поездов	6,13	0,39	5,86	6.10	6,36
	Повышение процента используемой силы тяги и применение технических решений	5,54	0,48	5,18	5,41	5,78

На основании полученных значений межпоездных интервалов возможно определить пропускную способность перегона [191]:

$$n = \frac{(1440 - t_{\text{ТЕХ}})\alpha_{\text{ТО}}}{I_{\text{Р}}} \quad (4.1)$$

где, $t_{\text{ТЕХ}}$ – продолжительность суточного бюджета времени, необходимого для выполнения содержания и плановых ремонтных работ устройств инфраструктуры, 150 мин;

$\alpha_{\text{ТО}}$ – коэффициент надежности транспортного обслуживания, 0,96.

$I_{\text{Р}}$ – расчетный межпоездной интервал, мин.

Результаты расчетов пропускной способности сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Пропускная способность одного пути двухпутного перегона

Масса поездов	Схема	Среднее значение количества поездов в сутки	Перцентиль		
			25%	50%	75%
$m_{п}=2800т$	Отправление на желтый	198	-	-	-
	Повышение процента используемой силы тяги при отправлении на желтый (41-90%)	217	223	214	208
	Применение технических решений (2 участка удаления 3-5 км) - двухблочное разграничение движения поездов	247	268	263	258
	Повышение процента используемой силы тяги и применение технических решений	247	273	272	270
$m_{п}=4400т$	Отправление на желтый	170	-	-	-
	Повышение процента используемой силы тяги при отправлении на желтый (41-90%)	197	212	199	189
	Применение технических решений (2 участка удаления 3-5 км) – двухблочное разграничение движения поездов	235	239	235	231
	Повышение процента используемой силы тяги и применение технических решений	236	242	235	233
$m_{п}=6300т$	Отправление на желтый	139	-	-	-
	Повышение процента используемой силы тяги при отправлении на желтый (41-90%)	173	191	177	166
	Применение технических решений (2 участка удаления 3-5 км) – двухблочное разграничение движения поездов	202	211	203	194
	Повышение процента используемой силы тяги и применение технических решений	223	239	228	214

Получена оценка потенциального прироста пропускной способности при повышении процента используемой силы тяги, использовании технических решений для обеспечения движения поездов в виртуальной сцепке с двухблочным разграничением, а также при одновременном использовании технических решений и повышении процента используемой силы тяги (рисунок 4.12).

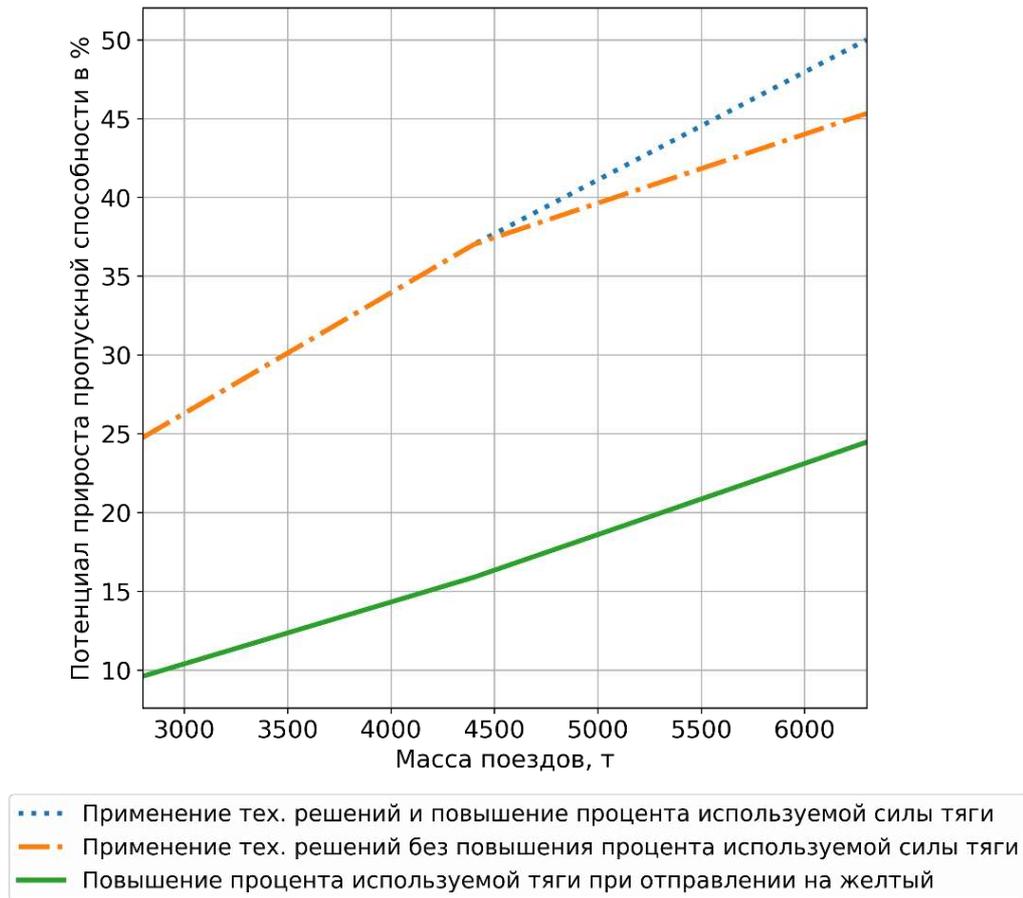


Рисунок 4.12 – Зависимость прироста способности перегона от массы поезда при разных способах ее развития

На рисунке 4.12 представлен график прироста расчетной пропускной способности перегона при движении поездов в виртуальной сцепке в зависимости от массы при отправлении на желтый сигнал выходного, увеличении процента используемой силы тяги локомотива, применении технических решений. Зеленой сплошной линией обозначены значения прироста пропускной способности при интервалах попутного отправления поездов различной массы на желтый сигнал выходного светофора, т.е. при освобождении хвостом уходящего поезда первого участка удаления, выходной открывается выходной светофор следующему поезду.

При увеличении процента используемой силы тяги с 41% до 90%, в среднем пропускная способность увеличивается для разных масс поездов по-разному, так для массы поезда 2800 т средний прирост от увеличения процента используемой тяги составляет 9%, для массы поезда 4400 т – 18%, а для поездов массой 6300 т

получается наибольший эффект от повышения доли используемой силы тяги – 24%.

Применение разработанных технических решений (желтая штрихпунктирная линия на рисунке 4.12), позволяет увеличить пропускную способность перегона без увеличения процента используемой силы тяги на 23% для поездов массой 2800 т, 37% для поездов массой 4400 т и 40% для поездов массой 6300 т. Нелинейность прироста пропускной способности при увеличении массы связана с тем, что для относительно «легких поездов» 2800 т, применение технических решений позволяет без увеличения процента используемой силы тяги организовывать отправление с интервалами менее 5 мин, что будет нарушать установленное ограничение по минимальному интервалу попутного прибытия, поэтому из расчетов пропускной способности данные значения интервалов были исключены и заменены на интервал равный 5-ти минутам. При этом увеличение массы приводит к тому, что обеспечения 5-ти минутного интервала необходимо (помимо применения технических решений) использовать резервы по увеличению процента используемой силы тяги – для поездов массой 6300 т увеличение процента используемой силы тяги может обеспечить увеличение пропускной способности еще на 10%.

Предельный прирост пропускной способности с точки зрения развития устройств железнодорожной автоматики и локомотивных систем, возможен при увеличении процента используемой силы тяги на участке с реализованными техническими решениями по обеспечению отправления поездов в ВСЦ с интервалом при двухблочном разграничении движения поездов (синяя пунктирная линия на рисунке 4.12). Так для поездов массой 2800 т предельный прирост составляет 23%, для поездов массой 4400 т – 38%, а для поездов массой 6300 т – 50%.

Выполненные расчеты межпоездных интервалов и пропускных способностей не учитывают ограничений связанных с количеством путей на станциях, технологии работы с поездами, а также ограничений по системам электроснабжения, однако позволяют сделать оценку повышения пропускной способности перегона за счет совершенствования алгоритмов работы устройств автоматики и телемеханики при использовании технологии виртуальной сцепки поездов.

Выводы по 4 главе

Результатами исследований в 4 главе являются: технология отправления грузовых поездов в виртуальной сцепке и технические решения для станционных систем автоматики, позволяющие осуществлять попутное отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом, соответствующим времени при движении поездов с двухблочным разграничением на участке внедрения технологии виртуальной сцепки, включают в себя:

- описание особого режима функционирования станции при отправлении поездов в виртуальной сцепке;
- методику определения мест установки дополнительных светофоров, необходимых для обеспечения безопасности движения при отправлении поездов в виртуальной сцепке;
- алгоритм работы светофоров при отправлении поездов в виртуальной сцепке;
- алгоритм кодирования маршрута отправления ведомых поездов;
- технические решения для системы МПЦ-МПК, позволяющие осуществлять отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом двухблочного разграничения.

Дана оценка потенциального прироста пропускной способности при использовании технологии виртуальной сцепки в зависимости от массы поездов, наибольший прирост составляет до 50% для поездов массой 6300 т при использовании технических решений и повышении процента используемой силы тяги.

Представленные подходы могут быть использованы разработчиками систем электрических централизаций для разработки собственных технических решений увязки станционных и перегонных устройств автоматики и телемеханики при отправлении поездов, с применением технологии виртуальной сцепки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном диссертационном исследовании изложены новые научно-обоснованные технико-технологические решения, в области совершенствования систем железнодорожной автоматики, направленные на повышение пропускной способности железных дорог, имеющие существенное значение для развития железнодорожного транспорта. Решение поставленных задач позволяет повысить пропускную способность участков железных дорог за счет применения технологии виртуальной сцепки поездов.

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

1. Проанализированы способы повышения пропускной способности железных дорог, выделены перспективные направления, связанные с совершенствованием железнодорожной автоматики и телемеханики. Показано, что дальнейшее эффективное применение технологии виртуальной сцепки может увеличить пропускную способность при решении вопроса, связанного с уменьшением межпоездного интервала при приеме и отправлении поездов.

2. Разработана методика моделирования движения поездов, основанная на применении регрессионной модели, позволяющая выполнять построение кривых скоростей поезда с учетом массы поезда, уклона пути и процента используемой силы тяги.

3. По результатам моделирования движения поездов в виртуальной сцепке определены требования к станционным системам автоматики и технологии работы станции. Определены условия, при которых потребуется строительство разгонного пути. Представленный метод определения длины разгонного пути, показал, что при полном использовании тягового ресурса, на участке пути с плоским профилем, строительство разгонного пути длиной 1800 м, позволит реализовывать интервалы попутного отправления от 3 минут для поездов массой до 6300 т.

4. Разработаны технические решения (алгоритмы работы светофоров и кодирования) по совершенствованию станционных систем автоматики для обеспечения отправления поездов в виртуальной сцепке с заданным межпоездным интервалом. Дана оценка потенциального прироста пропускной способности при использовании технологии виртуальной сцепки в зависимости от массы поездов. С увеличением массы прирост пропускной способности увеличивается. Наибольший прирост пропускной способности может достигать 50% для поездов массой 6300 т, при использовании технических решений и повышении процента используемой силы тяги.

Перспектива дальнейшей разработки темы исследования – разработка методики экономической оценки организации движения поездов в виртуальной сцепке с заданным межпоездным интервалом на участке, оборудованном представленными техническими решениями.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБ – автоблокировка

БЛОК – безопасный локомотивный объединенный комплекс

БЭК/БЭК2 – блок электроники и коммутации

БФРЧ – блок формирования рельсовых частот

ВНИИЖТ – Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

ВСЦ – виртуальная сцепка

ЖАТ – железнодорожные системы автоматики и телемеханики

УрГУПС – Уральский государственный университет путей сообщения

ИСАВП-РТ – Интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами

КЛУБ – комплексное локомотивное устройство безопасности

МПСУиД – микропроцессорная система управления и диагностики локомотива

МПЦ-МПК – микропроцессорная централизация на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров

НИИАС – научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте

ПГУПС – Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I

ПТО – пункт технического осмотра

РПС – регистратор параметров системы САУТ

РПМ – регистратор параметров микропроцессорной системы управления локомотивом

САУТ – система автоматического управления торможением поезда

СИРДП – система интервального регулирования движения поездов

ЦКЖТ – центр компьютерных железнодорожных технологий

ЭЦ – электрическая централизация

1УУ – первый участок удаления

2УУ – второй участок удаления

3УУ – третий участок удаления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бестемьянов, П.Ф. Методика расчета интервальных допусков / П.Ф. Бестемьянов, А.М. Романчиков // Мир транспорта. – 2008. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 104-106.
2. Бестемьянов, П.Ф. Контроль движения при координатном регулировании / П.Ф. Бестемьянов, А.М. Романчиков // Мир транспорта. – 2008. – Т. 6. – № 1 (21). – С. 104-109.
3. Бестемьянов, П.Ф. Методика оценки качества управления при координатном способе интервального регулирования / П.Ф. Бестемьянов, А.М. Романчиков // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 71-74.
4. Переборов, А.С. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики / А.С. Переборов, А.М. Брылеев, Сапожников Вл.в., и др. – Транспорт, . – 384 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23808801> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].
5. Никитин, А.Б. 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. DOI: 10.34649/AT.2023.4.4.001.
6. Бушуев С.В. Управление потоком поездов на основе интеллектуализации локомотива и цифровой радиосвязи / Бушуев С.В. – Екатеринбург, 2020.
7. Бушуев, С.В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог / С.В. Бушуев // Автоматика на транспорте. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 343-353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353.
8. Бушуев, С.В. Исследование точности измерений среднеквадратических значений электрических сигналов на ограниченных интервалах времени / С.В. Бушуев, А.Н. Попов // Транспорт Урала. – 2011. – № 2 (29). – С. 46-50.
9. Никитин, А.Б. 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.

10. 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.
11. Аношкин, В.В. Определение безопасной длины первого участка удаления / В.В. Аношкин, В.А. Воронин // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 8. – С. 2-4.
12. Воронин, В.А. АЛСО с подвижными блок-участками / В.А. Воронин, В.В. Воробьев, С.Н. Есырев // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 6. – С. 44-45.
13. Воронин, В.А. Инновационные элементы инфраструктуры железнодорожного комплекса: оценка технологий и показателей эксплуатационной работы / В.А. Воронин, С.А. Филипченко, П.В. Куренков и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – Инновационные элементы инфраструктуры железнодорожного Комплекса. – № 3. – С. 18-22. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-03-3.
14. Воронин, В.А. Многозначная АЛС на участках АЛСО с ПБУ / В.А. Воронин // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 7. – С. 2-5.
15. Воронин, В.А. Комплексная технология интервального регулирования движения поездов / В.А. Воронин, И.Р. Гургенидзе, М.А. Дежков, и др. – АО «Т8 Издательские технологии». – 216 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53947684> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].
16. Гавзов, Д.В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д.В. Гавзов, В.В. Сапожников, В.В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3-50.
17. Сапожников, В.В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В.В. Сапожников, В.В. Сапожников, Х.А. Христов, Д.В. Гавзов. – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – 272 с. – Режим доступа:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24082557> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].

18. Сапожников, В.В. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / В.В. Сапожников, Сапожников Вл.в., В.И. Талалаев и др. – Транспорт. – Режим доступа:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23787794> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].

19. Сапожников, В.В. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики / В.В. Сапожников, И.М. Кокурин, В.А. Кононов, и др. – Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте|Маршрут, . – 247 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21260771> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].

20. Кокурин, И.М. Методы определения «узких мест», ограничивающих пропускную способность железнодорожных направлений / И.М. Кокурин, В.С. Тимченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 1 (34). – С. 15-21.

21. Кокурин, И.М. Решения задач увеличения пропускной способности перегонов / И.М. Кокурин // Железнодорожный Транспорт. – 2021. – № 4. – С. 52-54.

22. Кокурин, И.М. Решения задач интервального разграничения поездов / И.М. Кокурин // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 438-451. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-438-451.

23. Кокурин, И.М. Технология определения длин фиксированных блок-участков / И.М. Кокурин, И.А. Пушкин // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 10. – С. 9-14. DOI: 10.34649/AT.2022.10.10.002.

24. Линьков, В.И. Методы повышения эффективности интервального регулирования движения поездов на железнодорожном транспорте / В.И. Линьков. – 2011. – С. 47.

25. Линьков, В.И. Система автоматизированного выбора параметров и оценки эффективности интервального регулирования движения поездов / В.И. Линьков // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 1. – С. 28-35.

26. Линьков, В.И. Ухудшение показателей эффективности интервального регулирования движения поездов, следующих с минимальным интервалом, при уменьшении интервала разбивки на блок-участки / В.И. Линьков, Е.В. Сёмочкин // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 2. – С. 66-71.

27. Загидуллин, Э.З. Совершенствование технологии интервального регулирования движения поездов / Э.З. Загидуллин, Е.В. Сёмочкин, В.И. Линьков, Д.С. Бояринцев. – [Электронный ресурс] // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 4. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20799786> (дата обращения: 20.10.2021).

28. Загидуллин, Э.З. Система интервального регулирования движения поездов с электронными блок-участками / Э.З. Загидуллин, В.И. Зорин, В.И. Линьков, В.Г. Новиков. – [Электронный ресурс] // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 7. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20734507> (дата обращения: 18.10.2021).

29. Ляной, В.В. Диагностические функции микропроцессорных систем жат / В.В. Ляной, Г.И. Тильк, М.В. Абакумов. – [Электронный ресурс] // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 4. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45148528> (дата обращения: 04.03.2022).

30. Ляной, В.В. Обеспечение безопасности движения железнодорожного транспорта на основе совершенствования индуктивных датчиков регистрации колеса / В.В. Ляной // Транспорт Урала. – 2016. – № 2 (49). – С. 93-98. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-93-98.

31. Тильк, И.Г. Перспективы развития систем ИРДП / И.Г. Тильк, В.В. Ляной // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 8. – С. 7-10.

32. Кононов, В.А. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности 190901.65 «Системы обеспечения движения поездов» ВПО : Высшее профессиональное образование. транспортные средства. Системы обеспечения движения поездов. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций / В.А. Кононов, А.А. Лыков, А.Б. Никитин. – 2-е изд., доп. и перераб.

– Москва : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп, 2014. – 346 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007888726> (дата обращения: 06.06.2023). – [Электронный ресурс].

33. Розенберг, Е.Н. Стратегия повышения эффективности перевозочного процесса / Е.Н. Розенберг. – [Электронный ресурс] // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 6. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39130805> (дата обращения: 18.10.2021).

34. Розенберг, Е.Н. Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности / Е.Н. Розенберг, А.В. Озеров, И.А. Панферов // Автоматика, Связь, Информатика. – 2022. – № 8. – С. 2-6. DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.001.

35. Розенберг, Е.Н. Интервальное регулирование движения поездов / Е.Н. Розенберг, А.А. Абрамов, В.В. Батраев. – [Электронный ресурс] // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 9. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29958748> (дата обращения: 12.03.2022).

36. Розенберг, Е.Н. Принципы построения систем управления и интервального регулирования движением поездов четвертого поколения / Е.Н. Розенберг. – [Электронный ресурс] // труды Восьмой научно-технической конференции. 2019 Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) / 2. – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», 2019. – С. 27-32. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42428782> (дата обращения: 05.11.2021).

37. Розенберг, Е.Н. Инновационная технология управления движением поездов / Е.Н. Розенберг. – [Электронный ресурс] // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 10. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30101728> (дата обращения: 18.10.2021).

38. Розенберг, Е.Н. О комплексном подходе к решению задачи повышения пропускной способности //– Режим доступа: <https://asi-journal-rzd.ru/integrated->

approach-to-increase-railway-capacity (дата обращения: 01.09.2022). – [Электронный ресурс].

39. Розенберг, Е.Н. Инновационное развитие систем интервального регулирования / Е.Н. Розенберг, В.В. Батраев. – [Электронный ресурс] // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 7. – Режим доступа:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35192906> (дата обращения: 25.09.2022).

40. Шаманов, В.И. Влияние отказов в системах интервального регулирования на движение поездов по двухпутным участкам / В.И. Шаманов. – [Электронный ресурс] // Автоматика На Транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 3. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46678992> (дата обращения: 12.03.2022).

41. Шаманов, В.И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В.И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 223-240.

42. Шаманов, В.И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В.И. Шаманов // Системы и устройства автоматки и телемеханики.

43. Абрамов, В.М. Безопасность систем железнодорожной автоматки и телемеханики / В.М. Абрамов, Б.Д. Никифоров, Д.В. Шалягин // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 4. – С. 28-43.

44. Гапанович, В.А. Внедрение методологии УРРАН в хозяйстве АТ / В.А. Гапанович, Б.Ф. Безродный, А.В. Горелик, Д.В. Шалягин // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 4. – С. 12-15.

45. Горелик, А.В. Принципы управления надежностью систем ЖАТ / А.В. Горелик, Б.Ф. Безродный, Д.В. Шалягин, П.А. Неваров // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 7. – С. 13-15.

46. Козлов, П.А. Оценка инфраструктурных транспортных проектов методом моделирования / П.А. Козлов, А.Э. Александров // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 5 (5). – С. 43-44.

47. Александров, А.Э. Использование моделей при расчете и оптимизации систем железнодорожного транспорта / А.Э. Александров // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 54-56.
48. Александров, А.Э. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления / А.Э. Александров, Н.В. Якушев // Управление большими системами: сборник трудов. – 2006. – № 12-13. – С. 5-14.
49. Бородин, А.Ф. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог / А.Ф. Бородин, В.В. Панин, М.А. Агеева и др. // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 158-169. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169.
50. Бородин, А.Ф. Научная оценка перспектив модернизации Восточного полигона сети Российских железных дорог / А.Ф. Бородин, М.В. Сторчак // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2017. – № 2. – С. 65-73.
51. Бородин, А.Ф. Использование пропускной способности станций при интервальном регулировании движения поездов / А.Ф. Бородин, Г.Г. Горбунов, А.Ю. Соколов и др. // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 2. – С. 29-36.
52. Бессоненко, С.А. Оптимизация параметров сортировочной горки по времени расформирования составов / С.А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2007. – № 9. – С. 30-34.
53. Бессоненко, С.А. Влияние скоростей движения поездов на показатели работы железной дороги / С.А. Бессоненко, Е.В. Климова, О.П. Югина // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 54-57.
54. Бессоненко, С.А. Принципы оптимизации параметров сортировочных горок / С.А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2010. – № 5. – С. 17-20.
55. Козлов, П.А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта / П.А. Козлов // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 12. – С. 28-31.
56. Гургенидзе, И.Р. Моделирование движения поездов для заданных параметров на примере МЦК / И.Р. Гургенидзе, С.В. Калинин, А.П. Козловский и др.

– [Электронный ресурс] // Автоматика, Связь, Информатика. – 2021. – № 6. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46108381> (дата обращения: 04.03.2022).

57. Гургенидзе, И.Р. Комплекс имитационного моделирования работы железнодорожных станций и участков / И.Р. Гургенидзе, С.В. Калинин, Д.Ю. Халевин, А.П. Козловский. – [Электронный ресурс] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 12. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47370123> (дата обращения: 18.04.2022).

58. Климова, Е.В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог / Е.В. Климова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (35). – С. 19-23.

59. Климова, Е.В. Технология «виртуальной сцепки» поездов как инструмент повышения провозной и пропускной способности линии / Е.В. Климова, Л.Е. Пилипушка, В.С. Рябов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 1. – С. 60-64.

60. Климова, Е.В. Пропускная и провозная способность перегонов при реализации технологии «виртуальная сцепка» грузовых поездов / Е.В. Климова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3 (47). – С. 53-64. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-3-53-64.

61. Левин, Д.Ю. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография / Д.Ю. Левин, В.Л. Павлов 5. – Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. – 364 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22311378> (дата обращения: 04.03.2022). – [Электронный ресурс].

62. Левин, Д.Ю. Диспетчерские центры и технологии управления перевозочным процессом / Д.Ю. Левин. – Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – Маршрут. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21325958> (дата обращения: 04.03.2022). – [Электронный ресурс].

63. Левин, Д.Ю. Резервы пропускной способности железных дорог / Д.Ю. Левин, В.Б. Соколова // Мир Транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 5 (78). – С. 146-159.
64. Левин, Д.Ю. Эксплуатация железных дорог в рыночных условиях / Д.Ю. Левин. – [Электронный ресурс] // Экономика железных дорог. – 2019. – № 10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41195841> (дата обращения: 04.03.2022).
65. Левин, Д.Ю. Диспетчерское управление вагонопотоками / Д.Ю. Левин. – [Электронный ресурс]. – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», 2019. – С. 51-58. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42428788> (дата обращения: 04.03.2022).
66. Тимухина, Е.Н. Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Е.Н. Тимухина, Н.В. Кащеева, В.С. Колокольников, А.А. Кощев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (49). – С. 26-33.
67. Тимухина, Е.Н. Технологические сбои и проблемы расчета и обеспечения функциональной надежности железнодорожных станций / Е.Н. Тимухина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2012. – № 1. – С. 29-32.
68. Тимухина, Е.Н. Схемные решения станций и узлов по изоляции маршрутов приема и отправления поездов от маневровой работы / Е.Н. Тимухина, Д.Р. Зартдинов // Наука в центральной России. – 2012. – № 2S. – С. 189-196.
69. Тимухина, Е.Н. Учет станционных и межпоездных интервалов при построении графика движения в имитационной системе ИСТРА / Е.Н. Тимухина, А.В. Шипулин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2012. – № 5. – С. 37-41.

70. Тушин, Н.А. Динамические резервы ускорения оборота вагона на малодеятельных участках / Н.А. Тушин, К.М. Тимухин, Т.А. Смородинцева. – [Электронный ресурс] // Транспорт Урала. – 2022. – № 2 (73). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48660128> (дата обращения: 31.07.2022).

71. Козлов, П.А. Организационные подходы и модели оптимизации / П.А. Козлов, О.В. Осокин, Н.А. Тушин // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 5 (38). – С. 18-23.

72. Козлов, П.А. Имитационная экспертиза проектов развития инфраструктуры / П.А. Козлов, Н.А. Тушин // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 2 (35). – С. 22-25.

73. Абрамов, А.А. Эффективность и инфраструктурное обеспечение тяжеловесного движения / А.А. Абрамов, В.О. Русаков // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 8. – С. 20-24.

74. Охотников, А.Л. Разработка систем для автономного подвижного состава / А.Л. Охотников, М.А. Чернин. – [Электронный ресурс] // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 11. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47180672> (дата обращения: 31.07.2022).

75. Баранов, Л.А. Беспилотная система управления движением поездов как составляющая цифровизации городского транспорта / Л.А. Баранов // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 441-449. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-4-441-449.

76. Баранов, Л.А. Оценка интервала попутного следования метropоездов для систем безопасности на базе радиоканала / Л.А. Баранов // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 2 (57). – С. 6-19.

77. Баранов, Л.А. Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке / Л.А. Баранов, П.Ф. Бестемьянов, Е.П. Балакина, О.Е. Пудовиков // Автоматика на транспорте. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 377-388. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388.

78. Оптимизация управления движением поездов: учебное пособие для студентов специальностей «Управление и информатика в технических системах» и

«Электрическая тяга». Оптимизация управления движением поездов / Л.А. Баранов ред. . – Москва : ФГБ ОУ ВПО «Московский гос. ун-т путей сообщ.», 2011. – 163 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006508099> (дата обращения: 07.08.2023). – [Электронный ресурс].

79. Баранов, Л.А. Обеспечение Безопасности Движения Поездов В Беспилотных Транспортных Системах / Л.А. Баранов. – [Электронный ресурс]. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 1995-1999. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41726987> (дата обращения: 20.10.2021).

80. Головин, В.И. Локомотивные системы безопасности движения поездов / В.И. Головин // Локомотив. – 2014. – № 6 (690). – С. 13.

81. Головин, В.И. Инновационные технологии в микропроцессорных системах безопасности движения поездов / В.И. Головин // Деловая слава России. – 2014. – № 2 (45). – С. 20-21.

82. Головин, В.И. Совершенствование локомотивных устройств безопасности / В.И. Головин // Деловая слава России. – 2013. – № 3 (41). – С. 32-33.

83. Головин, В.И. Комплекс БЛОК: прорывные технологии в системах обеспечения безопасности движения / В.И. Головин, Е.Е. Шухина, В.В. Висков, А.С. Архипов // Локомотив. – 2011. – Комплекс БЛОК. – № 6 (654). – С. 28-31.

84. Ерофеев, Е.В. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов, Я.М. Головичер, и др. – Транспорт. – 311 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45766769> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].

85. Баранов, Л.А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов, Я.М. Головичер. – Транспорт, . – 271 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45770628> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].

86. Кравцов, Ю.А. Перспективные способы кодирования рельсовых цепей тональной частоты / Ю.А. Кравцов, Е.В. Архипов, М.Е. Бакин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 119-126.

87. Кравцов, Ю.А. Интервальное регулирование при наличии помех / Ю.А. Кравцов, В.М. Сафро, А.Б. Чегуров // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10. – № 4 (42). – С. 66-70.
88. Никифоров, Б.Д. Повышение пропускной способности участков при автоблокировке с бесстыковыми тональными рельсовыми цепями / Б.Д. Никифоров, Ю.А. Кравцов, Е.В. Архипов, А.Е. Щербина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4 (36). – С. 107-112.
89. Наговицын, В.С. Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий / В.С. Наговицын. – ВИНТИ РАН, . – 100 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19634389> (дата обращения: 27.09.2023). – [Электронный ресурс].
90. Буйносов, А.П. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава / А.П. Буйносов, В.С. Наговицын, С.Л. Марулин // Научно-технический вестник поволжья. – 2018. – № 11. – С. 110-113.
91. Коваленко, В.Н. Проблема безопасности движения поездов и пути ее решения / В.Н. Коваленко, В.С. Наговицын, С.Ю. Гришаев // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3 (21). – С. 53-59. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-3-53-59.
92. Flammini, F. Towards Railway Virtual Coupling / F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone и др. // 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC) 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). – 2018. – С. 1-6.
93. Flammini, F. Compositional modeling of railway Virtual Coupling with Stochastic Activity Networks / F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone, V. Vittorini // Formal Aspects of Computing. – 2021. DOI: 10.1007/s00165-021-00560-5.
94. Dick, C.T. Relative train length and the infrastructure required to mitigate delays from operating combinations of normal and over-length freight trains on single-track railway lines in North America / C.T. Dick, I. Atanassov, F.B. Kippen, D. Mussanov

// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2019. – Vol. 233. – № 7. – P. 731-742. DOI: 10.1177/0954409718809204.

95. Dick, T. Quantifying Recent Trends in Class 1 Freight Railroad Train Length and Weight by Train Type / T. Dick, J. Zhao, X. Liu, S. Kirkpatrick // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2021. – C. 036119812110315. DOI: 10.1177/03611981211031534.

96. Atanassov, I. Capacity of Single-Track Railway Lines with Short Sidings to Support Operation of Long Freight Trains / I. Atanassov, T. Dick // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2015. – T. 2475. – C. 95-101. DOI: 10.3141/2475-12.

97. Diaz de Rivera, A. Potential for Moving Blocks and Train Fleets to Enable Faster Train Meets on Single-Track Rail Corridors / A. Diaz de Rivera, C.T. Dick, L.E. Evans // Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. – 2020. – T. 146. – № 8. – C. 04020077. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000403.

98. Parkes, M. Effects of Hazmat Train Speed Restrictions on Train Delay Performance and Railroad Line Capacity: Comparative Study with Two Railway Simulation Tools / M. Parkes, T. Dick, A. Diaz de Rivera // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2021. – Effects of Hazmat Train Speed Restrictions on Train Delay Performance and Railroad Line Capacity. – C. 036119812110368. DOI: 10.1177/03611981211036878.

99. Shao, J. Determination of the Minimum Departure Interval between Trains with same High-Speed at the Relatively Initial Station / J. Shao, L. Zhou, Z. Bai, Y. Shang // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – ТТ. 587-589. – C. 1737-1740. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1737.

100. Jingchun, G. Research on Optimization Design of Blocking Section Length of High-Speed Railway / G. Jingchun, S. Ni, Z. Chi // Advances in Smart Vehicular Technology, Transportation, Communication and Applications : Smart Innovation, Systems and Technologies / V.E. Balas et al. eds. . – Singapore : Springer, 2021. – P. 287-294.

101. Qiu, C. A Safety-oriented Train Tracking Method of Dynamic Moving Block Train Control System Based on Train-to-Train Communication / C. Qiu, T. Chen, S. Lu, H. WANG // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. – 2021. – Т. PP. DOI: 10.1109/MITS.2021.3049369.

102. Xun, J. An Overspeed Protection Mechanism for Virtual Coupling in Railway / J. Xun, M. Chen, Y. Liu, F. Liu // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 187400-187410. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029147.

103. Liu, L. Coordinated Control Method of Virtually Coupled Train Formation Based on Multi Agent System: Proceeding of the Second International Conference on Smart Vehicular Technology, Transportation, Communication and Applications, October 25-28, 2018 Mount Emei, China, Part 1 / L. Liu, P. Wang, B. Zhang, W. Wei. – 2019. – Coordinated Control Method of Virtually Coupled Train Formation Based on Multi Agent System. – С. 225-233.

104. Liu, L. Intelligent Dispatching and Coordinated Control Method at Railway Stations for Virtually Coupled Train Sets / L. Liu, P. Wang, W. Wei и др. // 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019. – 2019. – С. 607-612.

105. Liu, P. Fault tree analysis combined with quantitative analysis for high-speed railway accidents / P. Liu, L. Yang, Z. Gao et al. // Safety Science. – 2015. – Vol. 79. – P. 344-357. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.017.

106. Liu, Y. A Method for Maintaining Virtually Coupled States of Train Convoys / Y. Liu, D. Ou, Y. Yang, D. Dong // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2022. – P. 09544097221103333. DOI: 10.1177/09544097221103333.

107. Макаровичин А.М. Использование и развитие пропускной способности железных дорог / Макаровичин А.М., Дьяков Ю.В. – Москва : Транспорт, 1981. – 287 с.

108. Ковалев, В.И. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте / В.И. Ковалев, А.Т. Осьминин, В.А. Кудрявцев, и др. 1. – УМ-ЦЖДТ, . – 440 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21556322> (дата обращения: 29.10.2021). – [Электронный ресурс].

109. Бушуев, С.В. Анализ способов повышения пропускной способности железных дорог / С.В. Бушуев, Н.С. Голочалов // Транспорт Урала. – 2023. – № 1 (76). – С. 42-50. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-42-50.

110. Оленцевич, В.А. Комплекс организационно-технических и реконструктивных мероприятий, направленных на улучшение показателей работы участка на основе исследования системных связей и закономерностей функционирования железнодорожной транспортной системы / В.А. Оленцевич, В.Е. Гозбенко, С.К. Каргапольцев, Г.Н. Крамынина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 171-179. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).171-179.

111. Баленко, В.В. Анализ мероприятий, необходимых для повышения пропускной способности Восточного полигона / В.В. Баленко, Т.Н. Каликина, М.Ю. Кейно. – [Электронный ресурс] // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2016. – № 12. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27467039> (дата обращения: 20.10.2021).

112. Зубков, В.Н. Скорость движения поездов - индикатор качества перевозок пассажиров и грузов / В.Н. Зубков, Е.В. Рязанова, Е.А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 45-51.

113. Голочалов, Н.С. Анализ загруженности станций по данным архивов систем централизаций // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. LXXXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 20-24. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46699139> (дата обращения: 24.01.2022).

114. Бушуев, С.В. 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. – [Электронный ресурс] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (50). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46184264> (дата обращения: 24.01.2022).

115. Курбасов, А.С. Увеличение скоростей перевозки грузов как фактор повышения экономической эффективности железных дорог / А.С. Курбасов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 4. – С. 71-73.

116. Сотников, Е.А. Эффективность повышения скорости движения поездов по стрелочным горловинам станций на боковой путь / Е.А. Сотников, П.С. Холодник // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 1. – С. 25-29.

117. Шарапов, С.Н. Экономическая оценка повышения установленных скоростей движения грузовых поездов / С.Н. Шарапов // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 25-29.

118. Виноградов, С.А. О влиянии скорости движения грузовых поездов на эксплуатационные показатели / С.А. Виноградов, А.В. Новгородцева // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 15-18.

119. Кириллова, С.Ю. К определению коэффициентов съема пропускной способности участков железных дорог / С.Ю. Кириллова, К.Ю. Николаев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 4. – С. 230-238. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238.

120. Сотников, Е.А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на требуемую пропускную способность участков / Е.А. Сотников, К.П. Шенфельд // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2011. – № 5. – С. 3-9.

121. Яхимович, В.В. Варианты организации пропуска поездов при капитальном ремонте технических устройств на двухпутных линиях / В.В. Яхимович, А.В. Дмитренко, Г.И. Суханов, А.Н. Рожков // Современные технологии. системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3 (35). – С. 176-183.

122. Тимченко, В.С. Комплексная оценка пропускной способности железнодорожной линии в условиях реконструкции на основе имитации / В.С. Тимченко. – [Электронный ресурс]. – Институт экономики уральского отделения РАН, 2017. – С. 164-167. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30749644> (дата обращения: 20.10.2021).

123. Зубков, В.Н. Способы повышения пропускной способности участков дороги в периоды предоставления «окон» для выполнения ремонтных работ / В.Н. Зубков, А.В. Дутаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 1 (29). – С. 83-88.

124. Мехедов, М.И. О процессе взаимодействия технических станций и перегонов при пропуске поездопотоков / М.И. Мехедов, Л.А. Мугинштейн // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 2. – С. 59-65. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-2-59-65.

125. Мехедов, М.И. О проблемах организации движения и эффективности использования пропускных способностей станций / М.И. Мехедов, Л.А. Мугинштейн // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 7. – С. 20-27.

126. Мугинштейн, Л.А. Вопросы организации стабильного пропуска транзитных грузовых поездов на направлениях железных дорог с учетом технических и технологических особенностей работы технических станций и перегонов / Л.А. Мугинштейн, М.И. Мехедов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 1. – С. 3-11.

127. Мугинштейн, Л.А. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков / Л.А. Мугинштейн, М.И. Мехедов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 2. – С. 24-33.

128. Сай, В.М. Повышение провозной способности напряженных участков железных дорог / В.М. Сай, Е.И. Жироухов // Наука и транспорт. – 2006. – № 5. – С. 22-25.

129. Голиков, А.Ф. Использование современных программно-аппаратных средств при вождении поездов повышенной массы и длины на забайкальской железной дороге восточного полигона / А.Ф. Голиков, Е.А. Рудых // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 2. – С. 231-234.

130. Сотников, Е.А. Изменения пропускной и провозной способностей высокозагруженных направлений при организации движения соединенных поездов

на постоянной основе / Е.А. Сотников, П.С. Холодняк // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78. – № 5. – С. 259-265. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-265.

131. Кузьмина, Н.А. Исследование условий для вождения соединенных поездов на полигоне Двжд / Н.А. Кузьмина // International Journal of Advanced Studies. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 46-63. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-3-46-63.

132. Бышляго, А.А. Об организации пропуска соединенных поездов в целях повышения провозной и пропускной способностей Байкало- Амурской магистрали / А.А. Бышляго, А.В. Дудакова // Молодая наука Сибири. – 2018. – № 1 (1). – С. 1-7.

133. Егорова, Е.В. Обоснование вариантов повышения пропускной способности станции при работе с соединенными поездами / Е.В. Егорова, Н.В. Куклева // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР В XXI веке. – 2016. – Т. 1. – С. 159-162.

134. Москвичев, О.В. Сокращение срока доставки грузов за счет организации движения соединенных грузовых поездов в период предоставления «окон» / О.В. Москвичев, В.И. Александров, Е.В. Александров, Е.А. Мищенко // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 95-97.

135. Румянцев, С.В. Вождение поездов в системе интервального регулирования по технологии «виртуальная сцепка» / С.В. Румянцев // Локомотив. – 2019. – № 12 (756). – С. 2-3.

136. Дежков, М.А. Технология «виртуальная сцепка» для интервального регулирования движения поездов / М.А. Дежков, Г.К. Кисельгоф // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 11. – С. 28-30. DOI: 10.34649/AT.2021.11.11.007.

137. Шухина, Е.Е. Развитие локомотивных систем безопасности и управления / Е.Е. Шухина, Г.К. Кисельгоф // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 4. – С. 51-54.

138. 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. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.

139. Романенко, Д.С. Развитие технологии интервального регулирования движения поездов «виртуальная сцепка» / Д.С. Романенко, А.Н. Попов, С.А. Миклин. – [Электронный ресурс]. – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45847205> (дата обращения: 31.08.2023).

140. Бушуев, С.В. Расстояние сближения поездов при организации движения по технологии виртуальной сцепки / С.В. Бушуев, А.Н. Попов. – [Электронный ресурс] // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44551869> (дата обращения: 28.11.2021).

141. Голочалов, Н.С. Виртуальная сцепка поездов для повышения пропускной способности железных дорог / Н.С. Голочалов. – [Электронный ресурс]. – Сибирский институт бизнеса, управления и психологии, 2021. – С. 90-94. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45828851> (дата обращения: 24.01.2022).

142. Эсаулов, В.А. Эффективность пропуска спаренных грузовых поездов / В.А. Эсаулов, Б.И. Давыдов, К.Н. Никитенко, А.Г. Лазарев // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 69-78.

143. Асташков, Н.П. Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии «виртуальная сцепка» / Н.П. Асташков, В.А. Оленцевич, Ю.И. Белоголов, В.В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3 (67). – С. 173-180. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).173-180.

144. Власьевский, С.В. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С.В. Власьевский, О.А. Малышева, Н.Г. Шабалин,

В.В. Семченко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного Транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17-25. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25.

145. Баева, И.А. Влияние снижения времени межпоездного интервала на технико-энергетические показатели системы тягового нерегулируемого и регулируемого электроснабжения / И.А. Баева // Инновационный транспорт. – 2020. – № 1 (35). – С. 51-55. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-1-51-55.

146. Оленцевич, В.А. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке / В.А. Оленцевич, Р.Ю. Упырь, А.А. Антипина // Современные технологии. Системный анализ. моделирование. – 2020. – № 2 (66). – С. 182-189. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182-189.

147. Капустин, Н.И. Интервальное регулирование движения поездов на полигонах сети железных дорог / Н.И. Капустин, Е.П. Капустина, С.Д. Потрахов. – [Электронный ресурс]. – Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», 2019. – С. 70-74. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42428792> (дата обращения: 18.10.2021).

148. Васильев, А.Б. Влияние систем интервального регулирования движения поездов на межпоездной и станционный интервалы / А.Б. Васильев // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 4 (46). – С. 86-96.

149. Гургенидзе, И.Р. Сокращение интервала следования поездов на МЦК / И.Р. Гургенидзе, Д.С. Склярчук, В.С. Лобанова, А.И. Кузьмин // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 4. – С. 48-50.

150. Куренков, П.В. Подвижные блок-участки и виртуальные сцепки как инновационные составляющие транспортно-логистической инфраструктуры / П.В. Куренков, И.А. Солоп, Е.А. Чеботарёва // Логистика. – 2021. – № 1 (170). – С. 30-34.

151. Гордиенко, А.А. Повышение пропускной способности на лимитирующих участках Северо-кавказской железной дороги за счет интервального регулирования движения поездов / А.А. Гордиенко, В.Н. Зубков, Н.Н. Мусиенко. – [Электронный ресурс] // Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике. Сборник научных трудов III международной научно-практической конференции 2019 Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике / 2. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 98-102. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41547515> (дата обращения: 20.10.2021).

152. Воронин, В.А. О современных системах интервального регулирования в пределах станции / В.А. Воронин, Н.Б. Малахин // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 3. – С. 12-14.

153. Klimova, E. Impact of “Virtual Train Coupling” Technology on Railroad Performance / E. Klimova, L. Pilipushka. – [Electronic resource]. – 2022. – Mode of access: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48421836> (date of access: 27.09.2023).

154. Галинуров, Р.З. Исследование воздействия вибрации подвижного состава на сигнал распределенного оптического датчика с помощью численного моделирования / Р.З. Галинуров // Транспорт Урала. – 2021. – № 2 (69). – С. 101-105. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-101-105.

155. Галинуров, Р.З. Измерение скорости подвижного состава с помощью распределенного волоконно-оптического датчика / Р.З. Галинуров, А.Н. Попов // Наука и образование транспорту. – 2019. – № 1. – С. 314-318.

156. Попов, А.Н. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры / А.Н. Попов, Р.З. Галинуров // Транспорт Урала. – 2018. – № 3 (58). – С. 48-54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54.

157. Popov, A.N. Distributed fiber-optic sensors for location monitoring of rolling stock / A.N. Popov, S.V. Bushuev, R.Z. Galinurov, A.B. Nikitin. – [Electronic resource]. – American Institute of Physics Inc., 2021. – Mode of access: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46687359> (date of access: 31.08.2023).
158. Новиков, В.Г. Координатная система интервального регулирования движения поездов с расширенными функциональными возможностями локомотивного устройства: автореферат диссертации / В.Г. Новиков. – Москва : МИИТ, 2011. – 23 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19341836> (дата обращения: 12.03.2022). – [Электронный ресурс].
159. Шухина, Е.Е. Системы обеспечения безопасности движения поездов на базе радиоканала / Е.Е. Шухина, А.В. Низовский // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10. – С. 25-26.
160. Duan, H. Optimised Headway Distance Moving Block with Capacity Analysis / H. Duan, F. Schmid. – 2018. – 1 с.
161. Dong, H. Minimum safety distance model based follow operation control of high-speed train / H. Dong, X. Gao, Z. Luo, F. Chang // Engineering Letters. – 2018. – Т. 26. – С. 136-142.
162. Hao, A. A Key Step to Virtual Coupling / A. Hao, B. Yan, C. Niu. – 2020. – С. 6. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294225.
163. Wang, D. Adaptive Cruise Control of Virtual Coupled Trains Based on Sliding Mode / D. Wang, Y. Cao // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Т. 2224. – С. 012109. DOI: 10.1088/1742-6596/2224/1/012109.
164. Li, K.-P. An improved car-following model for railway traffic / K.-P. Li, Z. Gao // Journal of Advanced Transportation. – 2013. – Т. 47. DOI: 10.1002/atr.178.
165. Ye, J. Stability Analysis of Train Movement with Uncertain Factors / J. Ye, K. Li, X. Jiang // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Т. 2015. – С. 1-7. DOI: 10.1155/2015/230616.
166. Chandler, R.E. Traffic Dynamics: Studies in Car Following / R.E. Chandler, R. Herman, E.W. Montroll // Operations Research. – 1958. – Т. 6. – Traffic Dynamics. – № 2. – С. 165-184. DOI: 10.1287/opre.6.2.165.

167. Xie, P. Safe Departure Interval of Bullet Trains: Based on Block Section / P. Xie, W. Yang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Тт. 253-255. – Safe Departure Interval of Bullet Trains. – С. 1177-1180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.253-255.1177.

168. Вакуленко, С.П. Эксплуатационные аспекты моделирования транспортных систем / С.П. Вакуленко, Н.Ю. Евреенова, Д.Ю. Роменский, К.А. Калинин. – Российская открытая академия транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (МИИТ). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47669024> (дата обращения: 19.07.2023). – [Электронный ресурс].

169. Колокольников, В.С. Сравнение современных методов расчета железнодорожных станций / В.С. Колокольников, И.А. Ковалев // *Инновационный транспорт*. – 2015. – № 1 (15). – С. 80-82.

170. Хабаров, В.И. Создание имитационной модели движения поездов с использованием мультиагентного и дискретно-событийного подходов на примере Западно-Сибирской железной дороги / В.И. Хабаров, К.В. Красникова // *Известия Транссиба*. – 2017. – № 3 (31). – С. 143-154.

171. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – 2016.

172. Анисимов, В.А. Многоцелевые расчетно-аналитические комплексы искра и эра: комплексное решение проектных и производственных задач / В.А. Анисимов, В.В. Анисимов // *Транспортная инфраструктура сибирского региона*. – 2013. – Т. 1. – Многоцелевые расчетно-аналитические комплексы Искра и Эра. – С. 540-547.

173. Любченко, А.А. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic / А.А. Любченко, С.В. Бартош, В.А. Смирнов, Р.Á. Castillo // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2016. – № 3. – С. 87-92.

174. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. – Министерство транспорта Российской Федерации, .

175. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – Утверждены приказом Минтранса России № 250 от 23.06.2022, 2022.
176. Буйносов, А.П. Алгоритм автоматизированной расшифровки файлов регистратора параметров САУТ / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4 (57). – С. 6-10.
177. Регистратор параметров САУТ (РПС). Руководство оператора 97Ц.06.00.00. РО. – Екатеринбург : ООО «НПО САУТ», 2015. – 89 с.
178. Евсеев, И.Л. Регистратор параметров микропроцессорной системы управления и диагностики (РП-МПСУиД) электровозов серии 2ЭС6, как средство анализа работы тяговых электродвигателей / И.Л. Евсеев. – [Электронный ресурс] // материалы Второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ОАО «Российские железные дороги», Омский государственный университет путей сообщения. 2013. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2013. – С. 115-120. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21364634> (дата обращения: 20.08.2023).
179. Регистратор параметров МСУЛ РПМ. Руководство по эксплуатации. 07Б.02.00.00 РЭ2. – КБ САУТ. – Екатеринбург, 2018. – 89 с.
180. Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Управление потоком поездов на основе интеллектуализации локомотива и цифровой радиосвязи». – Екатеринбург : УрГУПС, 2020.
181. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Часть 1. Описание и работа. Технические характеристики и электрические схемы. 2ЭС6.00.000.000 РЭ. – ОАО «Уральский завод железнодорожного машиностроения». – 2008.
182. СП 237.1326000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования: утв. и введ. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации 06.07.2015. №208. Издание официальное. М., 2015.

183. СП 235.1326000.2015. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования. / Утвержден и введен в действие Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 6 июля 2015 г. N 205.

184. Донцов, В.К. Эксплуатационно-технические вопросы проектирования перегонных и станционных систем : учеб.-метод. пособие для выполнения курсового и дипломного проектирования / В.К. Донцов, С.С. Кокорин, Н.В. Масленко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2014. – 106 с.

185. Неугасов, Н.М. Проектирование автоматической блокировки на железнодорожном транспорте: Учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на ж.-д. транспорте». Проектирование автоматической блокировки на железнодорожном транспорте / Н.М. Неугасов, Н.М. Степанов, В.Д. Новиков. – Москва : Трансжелдориздат, 1958. – 348 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006431183> (дата обращения: 06.06.2023). – [Электронный ресурс].

186. Андреев, В.Е. Уровень автоматизации GoA4 перспективы на железных дорогах России и мира / В.Е. Андреев, В.А. Гапанович, А.Ю. Маняхин, Хардер Ян // Вестник Института Проблем Естественных Монополий: Техника Железных Дорог. – 2021. – № 1 (53). – С. 12-17.

187. Типовые материалы для проектирования. 410807-ТМП. Увязка электрической централизации блочной системы с различными устройствами УМРЦН-10. Альбом 1. Утверждены ОАО «РЖД» письмом ЦШТех 12/37 от 02.04.2009г.

188. Борисенко, А.П. Моделирование дискретно-событийных моделей железнодорожных сетей / А.П. Борисенко // Электронный Сетевой Политематический Журнал «Научные Труды Кубгту». – 2016. – № 10. – С. 236-244.

189. Кузнецов, С.К. Применение сетей Петри для моделирования железнодорожных систем (обзор) / С.К. Кузнецов, А.И. Потехин. – [Электронный ресурс] // 4. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 4937-4946. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22224674> (дата обращения: 21.10.2021).

190. Булавский, П.Е. Моделирование и оценка времени поиска неисправностей в системах интервального регулирования движения поездов на базе иерархических цветных сетей Петри / П.Е. Булавский, О.К. Ваисов // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 3. – С. 356-376. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376.

191. Инструкция по расчету пропускной и провозной способности железных дорог ОАО «РЖД». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 545 от 04.03.2022.

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

193. Голочалов, Н.С. Определение длины разгонного пути / Н.С. Голочалов // Инновационный транспорт. – 2023. – №3 – С. 41-47.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

КОД ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО
ЗНАЧЕНИЯМ УСКОРЕНИЙ

Функция для вычисления скорости, пройденного пути, координаты хвоста одного поезда написанная на языке программирования *Python* с использованием библиотеки работы с табличными данными *Pandas*

```
# Функция моделирования движения одного поезда
def poezd(**kwargs):
    # исходные данные для расчета
    t = kwargs.setdefault('t', 3000) # время движения в секундах
    Lп = kwargs.setdefault('Lп', 1000) # длина поезда в метрах
    I = kwargs.setdefault('I', 0) # задержка отправления поезда (интервал попутного отправления) в секундах
    n = kwargs.setdefault('n', 1) # индивидуальный номер поезда
    P = kwargs.setdefault('P', 2800) # вес поезда в тоннах
    F = kwargs.setdefault('F', 60) # процент используемой силы тяги
    u = kwargs.setdefault('u', 0) # уклон

    # Выбираем коэффициенты уравнения регрессии в зависимости от указанной массы поезда
    if P == 2800:
        b = 0.0150
        k1 = 0.0008
        k2 = -0.0004
        k3 = -0.0050

    #if P == 3200:
    #b =
    #k1 =
    #k2 =
    #k3 =

    if P == 4400:
        b = 0.0152
        k1 = 0.0005
        k2 = -0.0004
        k3 = -0.0065

    if P == 6300:
        b = 0.01040 # интерсепт старое (0.0053)
        k1 = 0.0004 #
        k2 = -0.0002#
        k3 = -0.0053 # уклон

    df = pd.DataFrame(index=np.arange(t)) # создаем таблицу

    df['NP']=n # номер поезда
    df['I']=I # интервал попутного отправления
    df['F']=F # процент используемой силы тяги
    df['a']=0 # ускорение поезда
    df['dt']=1 # шаг интегрирования, сек
    df['t']=0 # время от начала расчета, сек
    df['V']=0 # скорость поезда, м/с
```

```

df['S']=0 # координата головы поезда, м
df['Sx']=0 # координата хвоста поезда, м

# Производим вычисления на каждом шаге интегрирования (1 сек)
for i in df.index[1::]:
    # Если поезд не набрал максимальную скорость, движется с ускорением:
    if df['V'][i-1] <= 22:
        df.loc[df.index==i, 'a'] = round(k1*F + k2*(df['V'][i-1]) + k3*u + b, 3)
        df.loc[df.index==i, 'V'] = round(df['V'][i-1] + df['a'][i]*df['dt'][i], 2)
        df.loc[df.index==i, 'S'] = round(df['S'][i-1] + ((df['V'][i]+df['V'][i-1])/2)*df['dt'][i], 2)

    # Если поезд набрал максимальную скорость, движение равномерное
    else:
        df.loc[df.index==i, 'a'] = 0
        df.loc[df.index==i, 'V'] = round(df['V'][i-1] + df['a'][i]*df['dt'][i], 2)
        df.loc[df.index==i, 'S'] = round(df['S'][i-1] + ((df['V'][i]+df['V'][i-1])/2)*df['dt'][i], 2)

    df.loc[df.index==i, 't']=df['t'][i-1] + df['dt'][i]

    # сдвиг значений координаты, скорости и ускорения, в случае если интервал попутного отпра-
    # вления больше нуля
    df['S'] = df['S'].shift(1,fill_value=0)
    df['V'] = df['V'].shift(1,fill_value=0)
    df['a'] = df['a'].shift(1,fill_value=0)
    df['Sx']=df['S']-Lп
    am = df.loc[df['a']>0, 'a'].mean() # среднее ускорение разгона поезда

return(df) # вывод итоговой таблицы

```

Пример использование функции расчета одного поезда:

```

Iss = np.arange(180,600,10)
df = pd.DataFrame()

for i in Iss:
    r = poezd(I=i, F=20)
    df=pd.concat(r)

```

Функция для вычисления длины разгонного пути написанная на языке программирования *Python* с использованием библиотеки работы с табличными данными *Pandas*.

```
# Функция моделирования движения при отправлении по разгонному пути
def razg(**kwargs):
    # исходные данные для расчета
    t = kwargs.setdefault('t', 2000) # время движения в секундах
    Лп = kwargs.setdefault('Лп', 1000) # длина поезда в метрах
    I = kwargs.setdefault('I', 0) # задержка отправления поезда (интервал попутного отправления) в секундах
    n = kwargs.setdefault('n', 1) # индивидуальный номер поезда
    F = kwargs.setdefault('F', 60) # процент используемой силы тяги
    P = kwargs.setdefault('P', 2800) # вес поезда в тоннах
    #u = kwargs.setdefault('P', 2800) # вес поезда в тоннах

    # Выбираем коэффициенты уравнения регрессии в зависимости от указанной массы поезда
    if P == 2800:
        b = 0.0079 # интерсепт
        k1 = 0.0009 # коэффициент при проценте силы тяги
        k2 = -0.0004 # коэффициент при скорости

    if P == 3200:
        b = -0.0033
        k1 = 0.0011
        k2 = -0.0003

    if P == 4300:
        b = 0.0046
        k1 = 0.0004
        k2 = -0.0002

    if P == 6300:
        b = 0.0053 # интерсепт
        k1 = 0.0005 # скорость
        k2 = -0.0003 # сила тяги

    df = pd.DataFrame(index=np.arange(t)) # создаем таблицу

    df['NP']=n # номер поезда
    df['I']=I # интервал попутного отправления
    df['F']=F # процент используемой силы тяги
    df['a']=0 # ускорение поезда
    df['dt']=1 # шаг интегрирования
    df['t']=0 # время от начала расчета
    df['V']=0 # скорость поезда, м/с
    df['S']=0 # пройденный путь головой поезда (координата головы поезда), м
    df['Sx']=0 # координата хвоста поезда
    df['доХв']=0 # расстояние до хвоста впередиидущего поезда
    df['tпр']=30 # время принятия решения
```

```

df['S(t+тпр)']=0 # координата головы поезда в момент принятия решения
df['Стп']=0 # длина тормозного пути
df['Стп(t+тпр)']=0 # тормозной путь в момент принятия решения
df['Sзу']=600 # длина защитного участка
df['Lсп']=100 # длина стрелочной секции разгонного пути
df['Sum']=0 # вспомогательная величина для вычисления длины разгонного пути
df['Sx(t+I)']=0 # координата хвоста впередиидущего поезда в момент отправления позадииду-
щего поезда

# Вычисляем каждую секунду:
for i in df.index[1::]:
    # если поезд не набрал максимальную скорость:
    if df['V'][i-1] <= 22:
        # считаем ускорение как регрессионную модель
        df.loc[df.index==i, 'a'] = round(k2*(df['V'][i-1]) + k1*F + b, 3)
        # определяем скорость
        df.loc[df.index==i, 'V'] = round(df['V'][i-1] + df['a'][i]*df['dt'][i], 2)
        # определяем координату головы
        df.loc[df.index==i, 'S'] = round(df['S'][i-1] + ((df['V'][i]+df['V'][i-1])/2)*df['dt'][i], 2)
        # определяем тормозной путь по таблицам
        df.loc[df.index==i, 'Стп'] = Sbr.loc[(Sbr['brk']=='Пневматическое торможение')&
            (Sbr['type']=='Грузовой поезд')&
            (Sbr['coef']==0.25)&
            (Sbr['ukl']==0)&
            (Sbr['V']<=df['V'][i]), 'Sbr'].values[-1]
    # если поезд набрал максимальную скорость
    else:
        df.loc[df.index==i, 'a'] = 0
        df.loc[df.index==i, 'V'] = round(df['V'][i-1] + df['a'][i]*df['dt'][i], 2)
        df.loc[df.index==i, 'S'] = round(df['S'][i-1] + ((df['V'][i]+df['V'][i-1])/2)*df['dt'][i], 2)
        df.loc[df.index==i, 'Стп'] = Sbr.loc[(Sbr['brk']=='Пневматическое торможение')&
            (Sbr['type']=='Грузовой поезд')&
            (Sbr['coef']==0.25)&
            (Sbr['ukl']==0)&
            (Sbr['V']<=df['V'][i]), 'Sbr'].values[-1]
        df.loc[df.index==i, 't']=df['t'][i-1] + df['dt'][i]

# вычисляем длину разгонного пути
df['Sx']=df['S']-Lп
df['Sx(t+I)']=df['Sx'].shift(-I,fill_value=0)
df['S(t+тпр)']=df['S'].shift(-30,fill_value=0)
df['Стп(t+тпр)']=df['Стп'].shift(-30,fill_value=0)
df['доХв']=df['Sx(t+I)']-df['S']
df['Sum']=df['S(t+тпр)']+df['Стп(t+тпр)']+df['Lсп']+df['Sзу']
df['Lпн']=df['Sx(t+I)']-df['Lсп']
am = df.loc[df['a']>0, 'a'].mean() # среднее ускорение разгона поезда
df = df.loc[df.index<=df['t'].size-I]
L = df.loc[df['Sum']<=df['Sx(t+I)'], 'Lпн']

# настройка вывода длины разгонного пути в случае корректного расчета
if (L.size>0)&(L.index[0]>0):
    return (L.values[0], df)

```

```
else:  
    return(0, df)
```

Пример использование функции расчета длины разгонного пути:

```
Iss = np.arange(180,600,10) # задаем диапазон интервалов попутного отправления  
Lrp = [] # создаем список куда сохраняются полученные значения длин разгонного пути  
  
# В цикле производим вычисления  
for i in Iss:  
    r = razg(I=i, F=20)  
    Lrp.append(r[0])
```

Использование функции *poezd()* моделирования одного поезда для определения расстояния между поездами

```
# Определение расстояния между поездами с помощью функции расчета одного поезда
```

```
Is = [0, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540] # задаем интервалы попутного отправления
```

```
Fs = [40, 60] # задаем проценты используемой силы тяги
```

```
# создаем таблицы
```

```
dfLp1 = pd.DataFrame()
```

```
dfLp2 = pd.DataFrame()
```

```
dfP = pd.DataFrame()
```

```
n=1 # определяем номер первого в расчете поезда
```

```
# выполняем расчеты в цикле для всех наборов входных данных
```

```
for f in Fs:
```

```
    for i in Is:
```

```
        r = poezd(F=f, I=i, n=n) # использование функции poezd()
```

```
        dfP = pd.concat([dfP, r], axis=0) # объединение результатов всех расчетов в одну таблицу
```

```
        n+=1 # инкремент номера поезда
```

```
pp=[] # номера первых поездов в каждой группе по проценту силы тяги
```

```
for f in Fs:
```

```
    p = dfP.loc[(dfP['f']==f)&(dfP['I']==0), 'NP'].values[0]
```

```
    pp.append(p)
```

```
# определяем длины расстояний между поездами
```

```
for i in Is:
```

```
    dfLp1[fLp_{i}_40]=dfP.loc[(dfP['NP']==pp[0]), 'Sx']-dfP.loc[(dfP['f']==40)&(dfP['I']==i), 'S']
```

```
    dfLp2[fLp_{i}_60]=dfP.loc[(dfP['NP']==pp[1]), 'Sx']-dfP.loc[(dfP['f']==60)&(dfP['I']==i), 'S']
```

Использование функции *poezd()* моделирования одного поезда для определения граничных условий при отправлении поездов в виртуальной сцепке

```
# Использование функции расчета одного поезда для определения граничных условий
# при отправлении поездов в виртуальной сцепке
Fs = [20,22,25,30,40,50,60,70,80,90,100] # задаем диапазон используемых процентов силы тяги
dist = [3000,4000,5000] # задаем дистанцию виртуальной сцепки
uch = [3000,4000,5000,6000] # задаем длину участка для набора заданной дистанции

res = [] # список для сохранения результатов вычислений интервалов попутного отправления

# В цикле для всех входных данных производим вычисления с помощью функции poezd()
for d in dist:
    for u in uch:
        for f in Fs:
            p = poezd(F=f, I=0, P=6300)
            t1 = p.loc[p['S']<=u, 't'].values[-1]
            t2 = p.loc[p['Sx']<=(u+d), 't'].values[-1]
            dt = t2-t1
            res.append(dt)
```

Код программы для извлечения табличных тормозных путей написанной на языке программирования *Python* с использованием библиотеки работы с табличными данными *Pandas*.

```
# Извлечение тормозных путей из таблиц по эксплуатации тормозов
Sbr = pd.read_excel('Brake.xlsx')

Sbr_p = pd.DataFrame()

# формируем исходную таблицу, отбираем данные
Sbr_p = Sbr.loc[(Sbr['Тип поезда'] == 'Грузовой поезд') &
               (Sbr['Тип торможения'] == 'Пневматическое торможение') &
               (Sbr['V, км/ч'] <= 80) &
               (Sbr['Уклон'] > -10)].copy() # уклоны круче -10 содержат не все значения тормозных путей
# пересчитываем скорость в м/с
Sbr_p['V'] = (Sbr_p['V, км/ч'] / 3.6).round(2)
# создаем колонку с индивидуальным номером
Sbr_p['NP'] = 0
Sbr_p.index = [i for i in range(0, round(Sbr_p['V'].size), 1)]
ind = [i for i in range(0, round(Sbr_p['V'].size), 15)]
jnd = [i for i in range(15, round(Sbr_p['V'].size) + 15, 15)]
num = [i for i in range(len(ind))]
# присваиваем номера
for i, j, n in zip(ind, jnd, num):
    Sbr_p.loc[(Sbr_p.index >= i) & (Sbr_p.index < j), 'NP'] = n

Sbr_i = pd.DataFrame()

# интерполируем значения тормозных путей, полиномом лагранжа 6 степени
for i in num:
    polyK = np.polyfit(Sbr_pi.loc[Sbr_p['NP'] == i, 'V'], Sbr_pi.loc[Sbr_p['NP'] == i, 'Тормозной путь'], 6)
    newV = np.arange(start=0, stop=22.3, step=0.05)
    polyval = np.polyval(polyK, newV)
    PBS = pd.Series(data=polyval, name='Sbr')
    Sbr_i = pd.concat((Sbr_i, PBS), axis=0, ignore_index=True)

Sbr_i.columns = ['Sbr']
Sbr_i['NP'] = 0
Sbr_i['V'] = 0
Sbr_i['ukl'] = 0
Sbr_i['brk'] = 0
Sbr_i['type'] = 0
Sbr_i['coef'] = 0

ind = [i for i in range(0, Sbr_i['Sbr'].size, len(newV))]
jnd = [i for i in range(len(newV), Sbr_i['Sbr'].size + len(newV), len(newV))]

# собираем итоговую таблицу
```

```

for i, j, n in(zip(ind, jnd, num)):
    Sbr_i.loc[(Sbr_i.index>=i)&(Sbr_i.index<j), 'V'] = newV
    Sbr_i.loc[(Sbr_i.index>=i)&(Sbr_i.index<j), 'NP'] = n
    Sbr_i.loc[(Sbr_i.index>=i)&(Sbr_i.index<j), 'ukl'] = Sbr_p.loc[Sbr_p['NP']==n, 'Уклон'].values[0]
    Sbr_i.loc[(Sbr_i.index>=i)&(Sbr_i.index<j), 'type'] = Sbr_p.loc[Sbr_p['NP']==n, 'Тип поезда'].values[0]
    Sbr_i.loc[(Sbr_i.index>=i)&(Sbr_i.index<j), 'coef'] = Sbr_p.loc[Sbr_p['NP']==n, 'Тормозной коэффициент'].values[0]
    Sbr_i.loc[(Sbr_i.index>=i)&(Sbr_i.index<j), 'brk'] = Sbr_p.loc[Sbr_p['NP']==n, 'Тип торможения'].values[0]

```

```

Sbr_i.loc[Sbr_i['V']==0, 'Sbr']=0
Sbr_i.loc[Sbr_i['Sbr']<0, 'Sbr']=0

```

```

# Вычислить тормозной путь за время срабатывания тормозов
# Время распространения тормозной волны + время заполнения тормозных цилиндров
# Распространение тормозной волны 250м/с * длину поезда, возьмем 4 сек и еще 4 секунды тк это не экстренное торможение

```

```
t = 8
```

```

Sbr_i['Sr']=Sbr_i['V']*t
Sbr_i.loc[Sbr_i['Sbr']<Sbr_i['Sr'], 'Sbr']=Sbr_i['Sr']
Sbr_i['Sbr-r']=Sbr_i['Sbr']-Sbr_i['Sr']
Sbr_i.loc[Sbr_i['Sbr-r']<=1, 'Sbr-r']=1
Sbr_i.loc[(Sbr_i['V']==0), 'Sbr-r']=0

```

```
# Вычислить ускорения по полученным табличным значениям
```

```
Ats = [0]
```

```

for i in range(1,len(Sbr_i.index)):
    if ((Sbr_i['Sbr-r'][i]-Sbr_i['Sbr-r'][i-1])>0)&(Sbr_i['Sbr-r'][i]>0):
        ai = - ((Sbr_i['V'][i])**2 - (Sbr_i['V'][i-1])**2)/(2*(Sbr_i['Sbr-r'][i]-Sbr_i['Sbr-r'][i-1]))
        Ats.append(ai)
    else:
        Ats.append(-1.5)

```

Функция, определяющая ускорение торможения по начальной скорости, уклону и тормозному коэффициенту:

```

def av_brk(ukl,vel,coef):
    if vel<=0.05:
        a = 0
    if vel>0.05:
        a = Sbr_i.loc[(Sbr_i['V']<=vel)&(Sbr_i['ukl']==ukl)&(Sbr_i['coef']==coef), 'at'].values[-1].round(4)
    return(a)

```

Функция, считающая значение тормозного пути при торможении с заданной начальной скорости, при заданном уклоне и тормозном коэффициенте, написанная на языке программирования *Python* с использованием библиотеки работы с табличными данными *Pandas*.

```
def Sbr_av(Vн, Vк, dv, ukl, coef):
    Sb = np.array([0])
    if (Vн)or(Vк)<=0.05:
        Sbc = [0,0]
    if Vн==0:
        Sbc = [0,0]
    if Vн > 0.05:
        for i in np.arange(Vн, Vк, -dv):
            i = round(i,2)
            if i>0.1:
                Sbr = -(i**2 - (i-dv)**2) / (2*av_brk(ukl=ukl,vel=i,coef=coef))
                Sb = np.append(Sb, Sbr)
                Sbc = np.cumsum(Sb)
    return(round(Sbc[-1],2))
```

Функция определения интервала попутного прибытия в зависимости от схемы приема, начальной скорости движения поезда, тормозного коэффициента и уклона пути, написанная на языке программирования *Python* с использованием библиотеки работы с табличными данными *Pandas*.

```
def brkf(**kwargs):
```

```
    t = kwargs.setdefault('t', 1000) # длительность выполнения расчетов, с
```

```
    Lп = kwargs.setdefault('Lп', 1000) # длина поезда, м
```

```
    Vн = kwargs.setdefault('Vн', 22) # начальная скорость, м/с
```

```
    Vог = kwargs.setdefault('Vог', 11) # скорость на участке с ограничением, м/с
```

```
    Sн = kwargs.setdefault('Sн', 5500) # точка начала ограничения скорости
```

```
    Ск = kwargs.setdefault('Ск', 7000) # точка остановки поезда
```

```
    coef = kwargs.setdefault('coef', 0.33) # тормозной коэффициент
```

```
    ukl = kwargs.setdefault('ukl', 0) # уклон
```

```
    df1 = pd.DataFrame(index=np.arange(t))
```

```
    df1['a']=0 # ускорение
```

```
    df1['dt']=1 # шаг интегрирования
```

```
    df1['t']=0 # время от начала расчета
```

```
    df1['V']=Vн # начальная скорость
```

```
    df1['S']=0 # координата головы поезда
```

```
    df1['Sx']=0 # координата хвоста поезда
```

```
    df1['СтпОГ']=0 # тормозной путь до начала ограничения скорости
```

```
    df1['СтпК']=0 # тормозной путь при движении со скоростью 20 км/ч
```

```
    df1['Стп0']=0 # тормозной путь до полной остановки
```

```
    # вычисления в цикле на каждом шаге интегрирования
```

```
    for i in df1.index[1::]:
```

```
        if df1['S'][i-1] <= Sн:
```

```
            #1 - равномерное движение
```

```
                if (df1['S'][i-1]+df1['СтпОГ'][i-1]) < Sн-100: # проверяем что голова+торм путь меньше точки начала ограничения
```

```
                    df1.loc[df1.index==i, 'a'] = 0
```

```
                    df1.loc[df1.index==i, 'V'] = Vн
```

```
                    df1.loc[df1.index==i, 'S'] = round(df1['S'][i-1] + ((df1['V'][i]+df1['V'][i-1])/2)*df1['dt'][i], 2)
```

```
                    df1.loc[df1.index==i, 'СтпОГ'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=Vог, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'Стп0'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=0, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
#2 - тормозим к точке начала ограничения скорости
```

```
if (df1['S'][i-1]+df1['СтпОГ'][i-1]) >= Sн-100: # начинаем подставлять ускорения
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'a'] = av_brk(ukl=ukl,vel=df1['V'][i-1],coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'V'] = round(df1['V'][i-1] + df1['a'][i]*df1['dt'][i], 2)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'S'] = round(df1['S'][i-1] + ((df1['V'][i]+df1['V'][i-1])/2)*df1['dt'][i], 2)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'СтпОГ'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=Vог, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'Стп0'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=0, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
if Sк-400 >= df1['S'][i-1] > Sн-100:
```

```
#3 - равномерное движение на участке с ограничением скорости
```

```
if (df1['S'][i-1]+df1['СтпК'][i-1]) < Sк-400: # движение с равномерной скоростью за вход-ным
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'a'] = 0
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'V'] = Vог #round(df1['V'][i-1] + df1['a'][i]*df1['dt'][i], 2)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'S'] = round(df1['S'][i-1] + ((df1['V'][i]+df1['V'][i-1])/2)*df1['dt'][i], 2)
```

```
2)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'СтпОГ'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=Vог, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'Стп0'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=0, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'СтпК'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=5.5, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
#4 - торможение к началу участка с ограничением скорости 20 км/ч за 400 метров до красного сигнала
```

```
if (df1['S'][i-1]+df1['СтпК'][i-1]) >= Sк-400: # начинаем тормозить к началу участка "за 400 м до"
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'a'] = av_brk(ukl=ukl,vel=df1['V'][i-1],coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'V'] = round(df1['V'][i-1] + df1['a'][i]*df1['dt'][i], 2)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'S'] = round(df1['S'][i-1] + ((df1['V'][i]+df1['V'][i-1])/2)*df1['dt'][i], 2)
```

```
2)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'СтпОГ'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=Vог, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'Стп0'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=0, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'СтпК'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=5.5, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)
```

```
#5 - равномерное движение со скоростью 20 км/ч при подъезде к красному сигналу
```

```
if Sк >= df1['S'][i-1] > Sк-400:
```

```
if (df1['S'][i-1]+df1['Стп0'][i-1]) < Sк-20: # движение с равномерной скоростью
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'a'] = 0
```

```
df1.loc[df1.index==i, 'V'] = 5.51 #round(df1['V'][i-1] + df1['a'][i]*df1['dt'][i], 2)
```

```

df1.loc[df1.index==i, 'S'] = round(df1['S'][i-1] + ((df1['V'][i]+df1['V'][i-1])/2)*df1['dt'][i],
2)

df1.loc[df1.index==i, 'Стп0'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=0, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)

#6 - торможение к месту остановки поезда
if (df1['S'][i-1]+df1['Стп0'][i-1]) >= Sk-20: # начинаем тормозить к месту остановки
df1.loc[df1.index==i, 'a'] = av_brk(ukl=ukl,vel=df1['V'][i-1],coef=coef)
df1.loc[df1.index==i, 'V'] = round(df1['V'][i-1] + df1['a'][i]*df1['dt'][i], 2)
df1.loc[df1.index==i, 'S'] = round(df1['S'][i-1] + ((df1['V'][i]+df1['V'][i-1])/2)*df1['dt'][i],
2)

df1.loc[df1.index==i, 'Стп0'] = Sbr_av(Vн=df1['V'][i], Vк=0, dv=0.05, ukl=ukl, coef=coef)

df1.loc[df1.index==i, 't']=df1['t'][i-1] + df1['dt'][i]

ind = df1.loc[df1['V']<1].index[0]

df1 = df1.drop(index=[i for i in range(ind,t,1)],axis=1)

df1['Sx']=df1['S']-Lп

tn = df1.loc[df1['V']<Vн, 't'].values[0] # момент времени начала снижения скорости
tk = df1.loc[df1['V']>=0, 't'].values[-1] # момент времени полной остановки поезда
tp = tk - tn # интервал попутного прибытия
a = df1.loc[df1['a']<0, 'a'].mean() # среднее ускорение торможения поезда
tсв = df1.loc[df1['S']<=Sn, 't'].values[-1] # момент времени достижения головой точки начала
ограничения скорости

# вывод результатов
return(df1, tn, tk, tp, a, Sk-20, tсв)

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ МПЦ-МПК ПОЗВОЛЯЮЩИЕ
ОСУЩЕСТВЛЯТЬ ОТПРАВЛЕНИЕ ПОЕЗДОВ С ИНТЕРВАЛОМ
ДВУХБЛОЧНОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ**

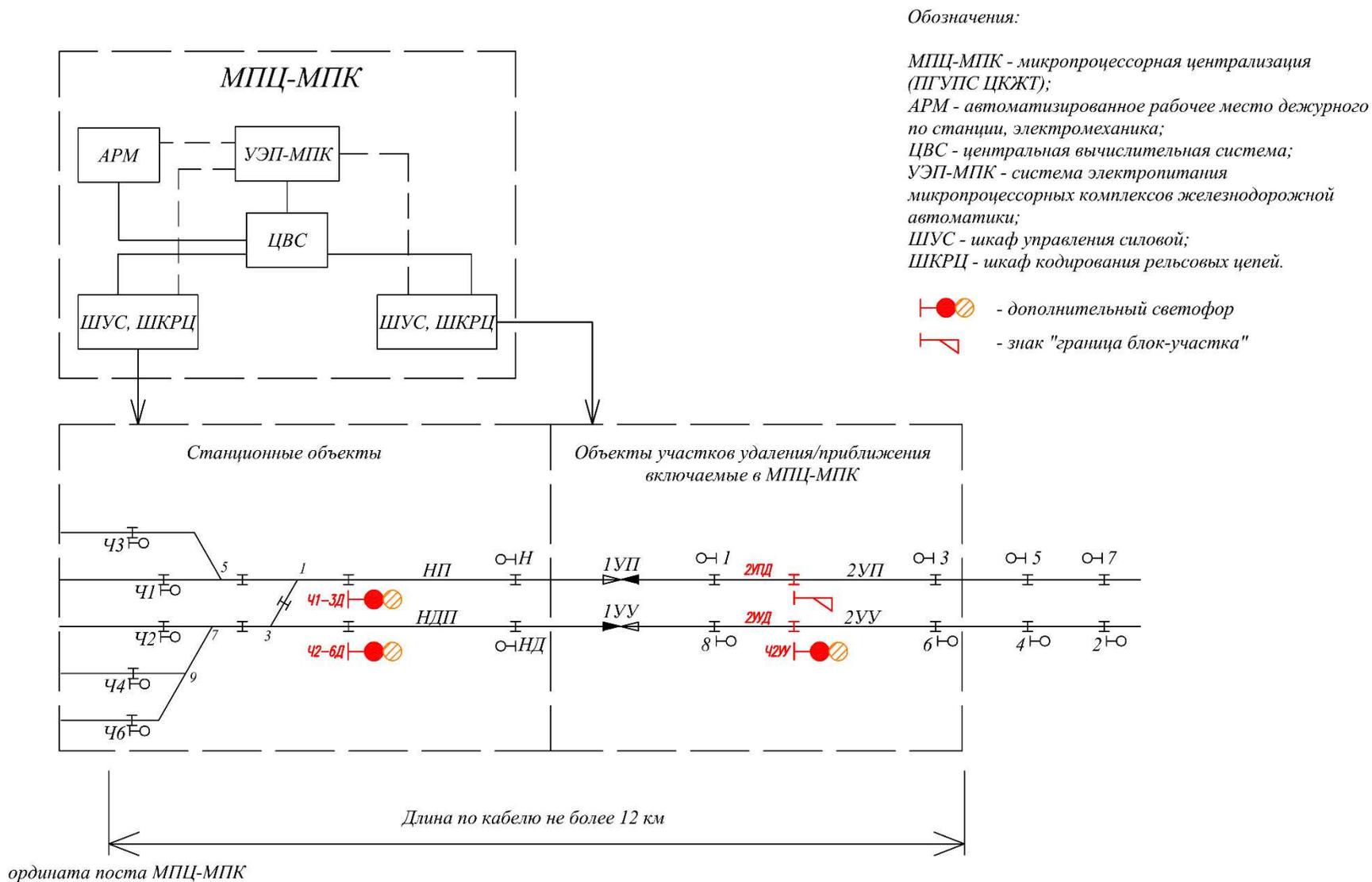
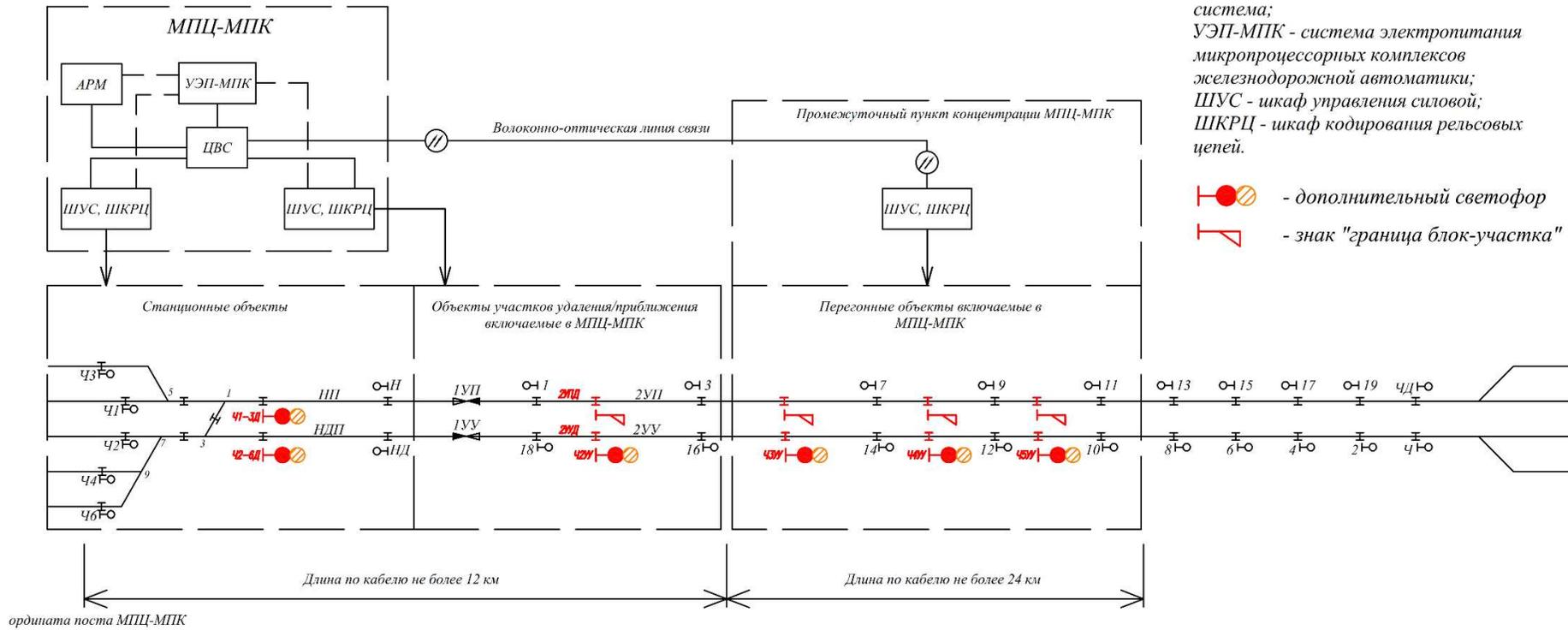


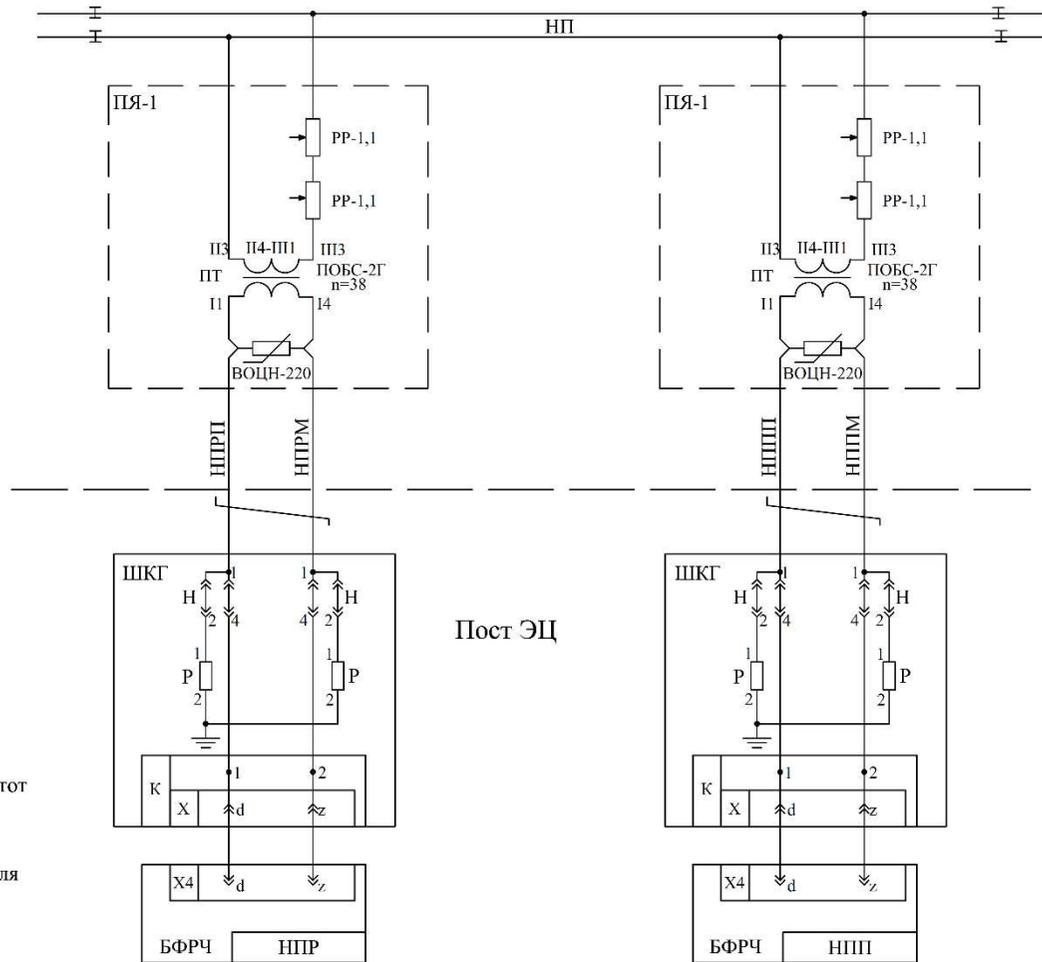
Рисунок Б.1 – Структурная схема оборудования станции и участков удаления дополнительными светофорами

Обозначения:

МПЦ-МПК - микропроцессорная централизация (ПГУПС ЦКЖТ);
 АРМ - автоматизированное рабочее место дежурного по станции, электромеханика;
 ЦВС - центральная вычислительная система;
 УЭП-МПК - система электропитания микропроцессорных комплексов железнодорожной автоматики;
 ШУС - шкаф управления силовой;
 ШКРЦ - шкаф кодирования рельсовых цепей.

 - дополнительный светофор
 - знак "граница блок-участка"





Обозначения:

ШКГ - шкаф кроссовый с грозозащитой
 БФРЧ - блок формирования рельсовых частот

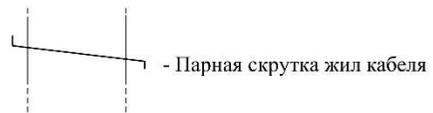
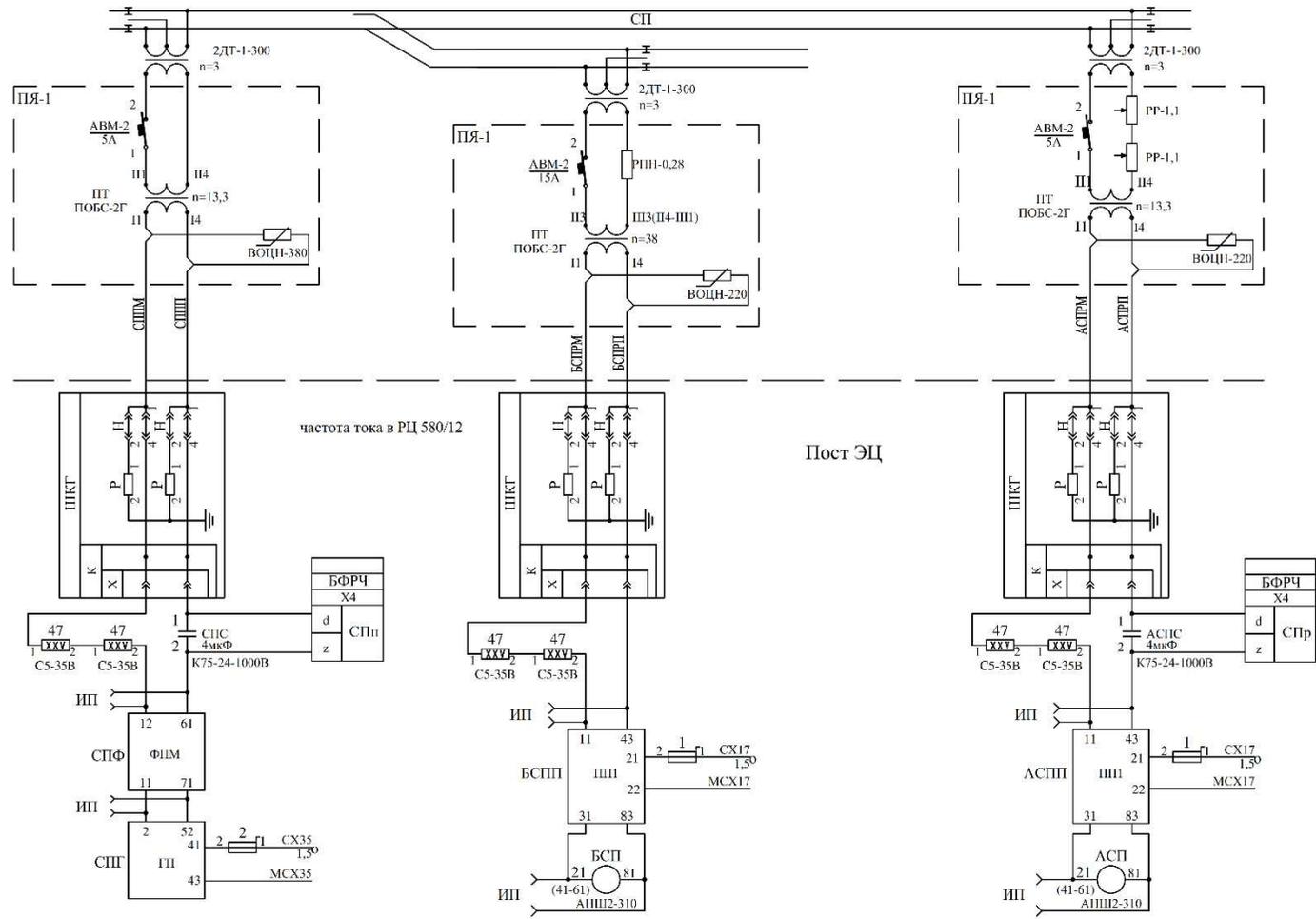
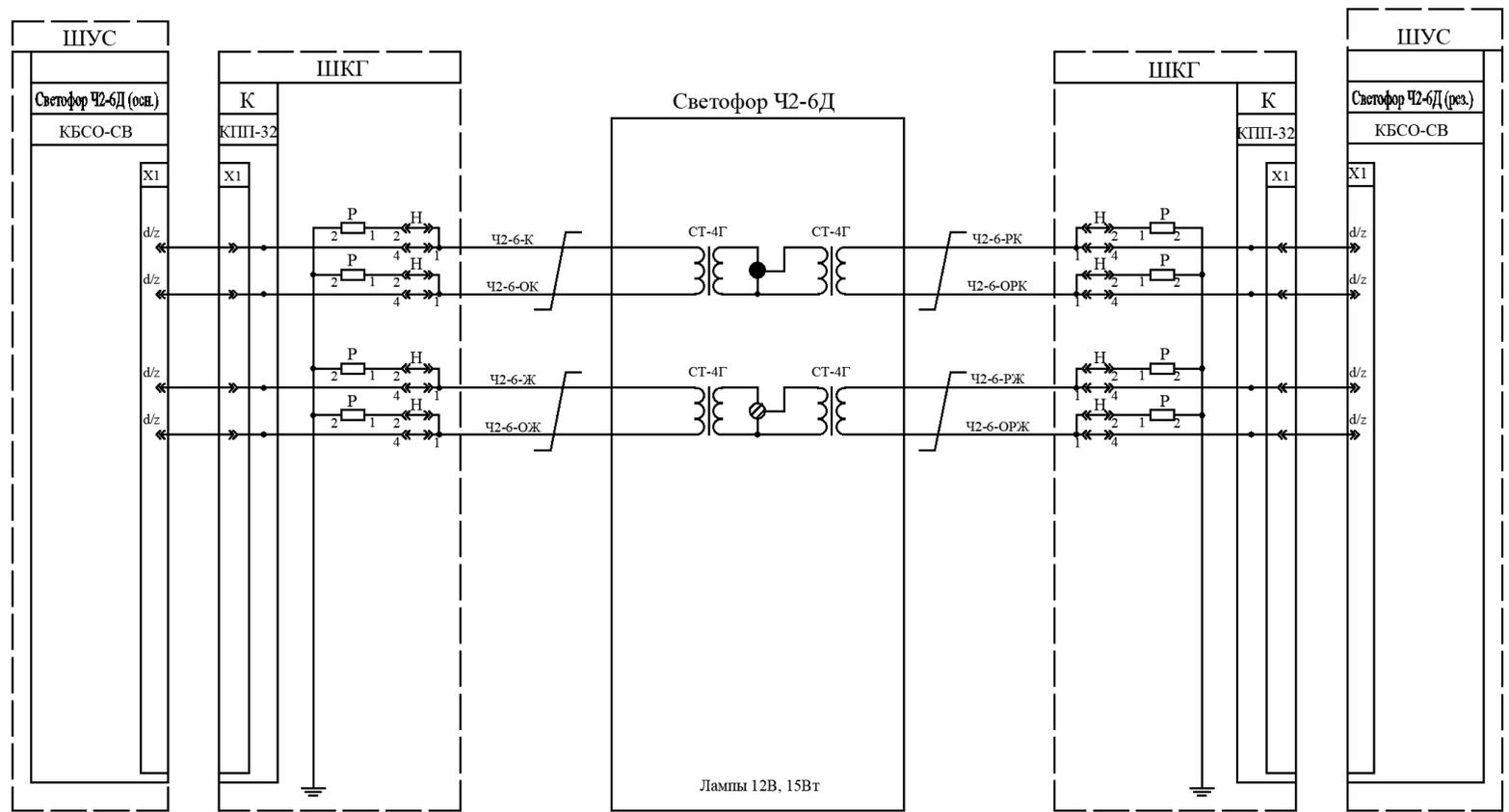


Рисунок Б.3 – Схема кодирования бесстрелочного участка пути



Обозначения:
 ШКГ - шкаф крестовый с грозозащитой
 БФРЧ - блок формирования рельсовых частот

Рисунок Б.4 – Схема кодирования стрелочного участка пути



Обозначения:

ШУС - шкаф устройств сопряжения силовой

ШКГ - шкаф кроссовый с грозозащитой

КБСО-СВ - контроллер безопасного сопряжения с объектами, управляющий светофорами

КППИ-32 - кросс-платы передачи

 - парная скрутка жил

Рисунок Б.5 – Схема управления огнями дополнительного светофора

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Комплексные Системы Автоматики»

620107, г. Екатеринбург, ул. Готвальда, дом 22, офис 5; ИНН/КПП 6659159080/667801001

АКТ

об использовании результатов
диссертационной работы Голочалова Николая Сергеевича на тему
**«Повышение пропускной способности железных дорог
за счет совершенствования работы устройств автоматики и телемеханики»**

Компания ООО «Комплексные системы автоматики» занимается проектированием и строительством объектов железнодорожной автоматики и телемеханики, а также разработкой систем и устройств обеспечения безопасности движения поездов.

Предложенные в диссертационной работе Голочалова Н.С. технические решения использовались при разработке программного обеспечения, расширяющего функционал релейно-процессорной электрической централизации ЭЦ-МПК-У, а именно алгоритмы работы светофоров и установки маршрутов при отправлении поездов с использованием технологии виртуальной сцепки.

Директор

08 СЕН 2023



К.Н. Мальных

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
ФГБОУ ВО УрГУПС

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по учебной работе и
связям с производством

Н.Ф. Сирина

«08» 09

2023

АКТ

об использовании результатов

диссертационной работы Голочалова Николая Сергеевича на тему
 «Повышение пропускной способности железных дорог за счет
 совершенствования работы устройств автоматики и телемеханики»
 в учебном процессе Федерального государственного бюджетного
 образовательного учреждения высшего образования
 «Уральский государственный университет путей сообщения»

Настоящим актом подтверждается, что технические решения и методика моделирования движения поездов при использовании технологии виртуальной сцепки, разработанные Голочаловым Н.С. на основе диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Данные технические решения используются при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплине «Технические средства диспетчерского управления».

Декан электротехнического факультета,
к.ф.-м.н., доцент

Башуров В.В.

Доцент кафедры
«Автоматика телемеханика и связь на
железнодорожном транспорте», к.т.н.

Бушуев С.В.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
тел. (812) 457-86-28, факс (812) 315-26-21, e-mail: dou@pgups.ru; http://www.pgups.ru
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502, ИНН 7812009592/ КПП 783801001

Центр компьютерных железнодорожных технологий

29.09.2023 г.

№ 005.06.4/1-413

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования Н.
Голочалова

Диссертация соискателя степени кандидата технических наук Н. Голочалова посвящена актуальным вопросам повышения пропускной способности железнодорожных участков. Автором обоснована важность согласованности взаимодействия станций и перегонов для задачи сокращения межпоездного интервала автоблокировки при отправлении поездов в виртуальной сцепке.

На основе статистических данных результатов математического моделирования автором было установлено, что для уменьшения интервала между попутно отправляющимися поездами в виртуальной сцепке следует проектировать дополнительные выходные светофоры в горловине станции. Это позволит обеспечить более раннее отправление второго поезда без освобождения первого участка удаления. Данная технология управления светофорной сигнализацией и кодированием маршрутов отправления использована в проекте технических решений ЦКЖТ.665211.010.Д9-ТР системы МПЦ-МПК, разработанной центром компьютерных железнодорожных технологий ФГБОУ ВО ПГУПС.

Главный инженер



В.В. Моисеев