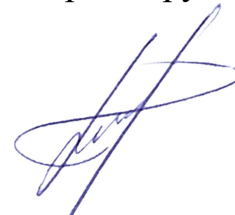


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(УрГУПС)

На правах рукописи



Галинуров Ришат Зинфирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕЕЗДА

2.9.4 Управление процессами перевозок (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент,
Попов Антон Николаевич

Екатеринбург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1 Вопросы организации участков извещения к объектам железнодорожной инфраструктуры	12
1.1 Анализ существующего метода расчета параметров работы переездной сигнализации.....	12
1.2 Управление технологическими процессами железнодорожного транспорта на основе информации о параметрах движения подвижного состава	21
1.3 Выбор целевого показателя для оценки функционирования железнодорожного переезда.....	24
1.4 Анализ средств измерения параметров движения подвижного состава.....	29
1.5 Выводы и постановка задач исследования	34
Глава 2 Разработка имитационной модели функционирования железнодорожного переезда.....	37
2.1 Постановка задачи по разработке модели	37
2.2 Формализованное описание процесса функционирования железнодорожного переезда	40
2.3 Разработка алгоритмов для определения длительности закрытого состояния переезда	42
2.4 Агент-ориентированный подход к построению имитационной модели	47
2.5 Метод оценки параметров работы переезда на основе статистических данных движения поездов	50
2.6 Экспериментальная проверка достоверности результатов моделирования.....	55
2.6.1 Расчет и оценка длительности закрытого состояния переезда	60
2.6.2 Расчет и оценка длины участка извещения к переезду	64
2.7 Исследование влияния сокращения межпоездного интервала на величину времени закрытого состояния переезда	72
2.8 Исследование влияния различных методов управления АПС на величину времени закрытого состояния переезда	76
2.9 Выводы по главе	79
Глава 3 Исследование безопасности движения поездов на железнодорожном переезде.....	81
3.1 Оценка уровня аварийности на железнодорожных переездах	81

3.2 Разработка стохастической модели функционирования железнодорожного переезда	85
3.2.1 Модель функционирования железнодорожного переезда на основе стохастической сети Петри	87
3.2.2 Методы анализа стохастической сети Петри	90
3.3 Модель взаимодействия потоков железнодорожного транспорта и автотранспорта на переезде.....	95
3.4 Влияние интенсивности движения транспортных потоков на безопасность движения поездов	101
3.5 Влияние изменения параметров работы АПС на безопасность движения поездов в зоне переезда	104
3.6 Выводы по главе	108
Глава 4 Измерение параметров движения поезда с помощью распределенных волоконно-оптических датчиков.....	110
4.1 Применение распределенных волоконно-оптических датчиков на железнодорожном транспорте.....	110
4.2 Основы оптической рефлектометрии распределенных оптических датчиков	116
4.3 Математическое моделирование сигнала фазочувствительного рефлектометра	121
4.4 Влияние вибрационного воздействия от подвижного состава на обратно рассеянный сигнал фазочувствительного рефлектометра	123
4.4.1 Анализ вибрационных процессов в земляном полотне при движении подвижного состава	123
4.4.2 Описание изменения фазовых соотношений обратно рассеянного излучения распределенного датчика при вибрационных воздействиях от подвижного состава	126
4.5 Разработка математической модели сигнала распределенного оптического датчика.....	127
4.5.1 Упрощенная математическая модель, описывающая взаимодействие приложенного возмущения на сигнал распределенного оптического датчика.....	127
4.5.2 Исследование влияния параметров колебания возмущения на сигнал распределенного оптического датчика	130
4.6 Разработка методов обработки сигнала распределенного датчика для решения задачи определения параметров движения поезда.....	132
4.6.1 Методы обработки сигнала распределенного оптического датчика	134
4.6.2 Методы определения местоположения движущегося поезда	136

4.6.3 Методы определения скорости движущегося поезда	138
4.6.4 Оценка значений параметров движения поезда на основе методов фильтрации	141
4.7 Выводы по главе	146
Глава 5 Разработка устройства управления АПС на основе параметров движения поезда	148
5.1 Концепция обеспечения безопасности устройства управления переездной сигнализацией	148
5.1.2 Обеспечение точности позиционирования объекта с помощью распределенных волоконно-оптических датчиков	151
5.1.3 Технология прокладки оптического сенсора распределенного датчика вдоль железнодорожного пути	155
5.2 Разработка структурно-функциональной схемы устройства управления АПС на основе параметров движения поезда	157
5.3 Выводы по главе	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	169
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	171
ПРИЛОЖЕНИЕ А	194
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	197
ПРИЛОЖЕНИЕ В	199
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	201
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	205

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В современных условиях повышения интенсивности грузовых и пассажирских перевозок, увеличения скоростей и массы поездов существующие системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), основанные на фиксированных параметрах функционирования, могут приводить к задержкам выполнения транспортных операций и нарушениям безопасности перевозочного процесса. Поэтому вопрос обеспечения безопасности транспортных процессов имеет особое значение при регулировании движения железнодорожного и автомобильного транспорта на переездах.

Но в настоящее время при управлении автоматической переездной сигнализацией (АПС) не учитываются параметры и характеристики движения поездов на участке приближения к переезду, что приводит к длительному закрытому состоянию переезда, угрозе нарушения безопасности движения поездов и простоя автомобильного транспорта.

Следовательно, разработка методов управления устройствами АПС на основе информации о скорости и местоположении приближающегося к переезду поезда и совершенствование методов оценки функционирования железнодорожного переезда являются актуальными направлениями научных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики и совершенствование качества управления перевозочным процессом внесли такие ученые, как Л.А. Баранов, П.Ф. Бестемьянов, А.И. Годяев, А.В. Горелик, Д.В. Ефанов, В.И. Линьков, В.М. Лисенков, А.Б. Никитин, Е.Н. Розенберг, В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Е.М. Тарасов, С.Т. Болтаев, В.Л. Герус, С.Ю. Гришаев, В.В. Ляной, В.П. Мохонько, А.В. Орлов, С.А. Щиголев и др.

Исследования ученых в основном посвящены вопросам совершенствования методов и алгоритмов определения характеристик движения поезда, повышения надежности работы устройств контроля проследования и определения местоположения подвижного состава (таких, как рельсовые цепи, индуктивные датчики колеса и др.), а также разработке бортовых комплексов, систем навигации и поездной радиосвязи. При этом открытыми остаются вопросы обоснования выбора применяемых систем и технических средств управления устройствами АПС и оценки эффективности функционирования железнодорожного переезда. Не рассматривались ранее и вопросы применения оптических распределенных датчиков для организации участков приближения к переезду.

Область исследований соответствует паспорту специальности 2.9.4 Управление процессами перевозок, а именно пунктам 6 «Системы и устройства автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, их эксплуатация, методы построения и испытания» и 8 «Информационное, математическое и алгоритмическое обеспечение систем управления, включая методологию исследования и проектирования».

Объект исследования – устройства обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта на переездах.

Предмет исследования – методы управления устройствами автоматической переездной сигнализацией.

Целью диссертационной работы является разработка методических и технических решений для систем управления автоматической переездной сигнализацией, обеспечивающих сокращение длительности закрытого состояния железнодорожного переезда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ методов расчета параметров работы переездной сигнализации, практики проектирования и построения системы автоматической переездной сигнализации и средств определения параметров движения поездов.

2. Разработать дискретно-событийную модель процесса функционирования железнодорожного переезда, позволяющую оценить параметры работы переездной сигнализации и определить минимальное, по условиям безопасности, время закрытого состояния переезда с учетом фактических данных о движении поездов по участку.

3. Разработать методы определения местоположения и скорости движущегося поезда на участке приближения к переезду на основе сигнала распределенного волоконно-оптического датчика для систем управления автоматической переездной сигнализацией.

4. Для оценки безопасности движения поездов на переезде разработать стохастическую модель функционирования железнодорожного переезда, учитывающую параметры работы переездной сигнализации и характеристики потоков железнодорожного транспорта и автотранспорта.

5. Разработать структуру устройства управления системой автоматической переездной сигнализации с учетом информации о параметрах движения поезда на участке приближения к переезду, на основе применения распределенных волоконно-оптических датчиков.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод исследования параметров работы переездной сигнализации, основанный на имитационном моделировании функционирования железнодорожного переезда, при котором учитываются размеры, параметры движения и категории поездов как на однопутных, так и на многопутных участках железной дороги.

2. Разработан метод оценки безопасности движения поездов на переезде на основе стохастической модели, представленной в виде сети Петри, которая позволяет описать взаимодействие потоков железнодорожного транспорта и автотранспортных средств на переезде.

3. Предложены методы определения местоположения, длины и скорости движущегося поезда на основе распределенного волоконно-оптического датчика, позволяющие организовать «подвижный» участок извещения к переезду.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в следующем:

1. С помощью имитационной модели исследовано влияние величины межпоездного интервала на временные соотношения работы переездной сигнализации (время открытого состояния за заданный промежуток времени, длительность закрытого состояния, время подачи извещения на переезд) на основе статистических данных размеров и параметров движения поездов на участке.

2. На основе предложенных методов оценки функционирования железнодорожного переезда исследовано влияние интенсивности движения транспортных потоков на безопасность движения поездов.

3. С помощью численного моделирования сигнала фазочувствительного рефлектометра распределенного волоконно-оптического датчика исследовано влияние вибрационного возмущения от подвижного состава на параметры сигнала обратного рассеяния.

Практическая значимость состоит в следующем:

1. Предложенные в работе методы исследования параметров работы переездной автоматики и безопасности движения поездов на переезде могут быть использованы для оценки эффективности существующих железнодорожных переездов.

2. Управление устройствами переездной сигнализации на основе параметров движения приближающегося к переезду поезда позволяет получить экономический эффект за счет повышения реализуемой пропускной способности участка, обеспечивая при этом сокращение времени простоя автотранспортных средств перед закрытым переездом.

3. Разработанные в работе методы математической обработки сигнала распределенного волоконно-оптического датчика могут быть использованы при разработке устройства управления автоматической переездной сигнализацией на основе параметров движения поезда (патент на изобретение № 2732685).

4. Программа, позволяющая рассчитать параметры переездной сигнализации на основе статистических данных движения поездов на участке (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663659), используется в учебном процессе кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения».

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались общенаучные методы исследования, метод формализации и математического представления исследуемых процессов. Для описания функционирования железнодорожного переезда применены методы имитационного моделирования и теория построения и анализа сетей Петри. Основы прикладной статистики и статистические методы анализа были использованы при обработке данных о параметрах движения поездов на железнодорожных участках. Кроме того, в работе применяются известные методы цифровой обработки сигналов: метод сглаживания, метод корреляционного анализа и метод фильтрации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель функционирования железнодорожного переезда, позволяющая рассчитать время пребывания переезда в закрытом состоянии, основанная на статистических данных параметров движения поездов на участке. С помощью модели установлено, что управление устройствами АПС на основе параметров движения поезда позволяет сократить суммарное время закрытого состояния переезда на 30 %.

2. Стохастическая модель взаимодействия транспортных потоков на переезде, реализованная в виде сети Петри, позволяющая численно оценить вероятности столкновения железнодорожного и автомобильного транспорта в зоне переезда. Выявлено, что применение метода управления устройствами АПС на основе информации о скорости и местоположении приближающегося к

переезду поезда не влияет на величину вероятности возникновения опасного состояния движения поездов.

3. Структура устройства управления системой автоматической переездной сигнализации, позволяющего сократить время подачи извещения на переезд за счет предлагаемых методов определения параметров движения поезда на участке приближения к переезду на основе сигнала распределенного волоконно-оптического датчика, укладываемого вдоль контролируемого пути.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается сопоставимостью теоретических и экспериментальных данных. Расхождения результатов измерения фактических значений времени закрытого состояния переезда и теоретических расчетов за заданный временной интервал не превышает 7 %. Разница в результатах объясняется принятыми упрощениями при математическом описании функционирования переезда и неполным соответствием реальным условиям работы переездной сигнализации.

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

- Международная конференция «Technological, economic and cultural evolution in retrospective and prospects» (Екатеринбург, 2017);
- Внутривузовская конференция электротехнического факультета УрГУПС (Екатеринбург, 2018);
- V Межвузовский научный семинар «Информационные технологии и когнитивная электросвязь» (Екатеринбург, 2019);
- XII Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» (Самара, 2019);
- Научный семинар аспирантов УрГУПС (Екатеринбург, 2019);
- Международная научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и инжиниринг» (Пермь, 2021);
- Международная научно-практическая конференция «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление (TLC2M)» (Екатеринбург, 2022);

– Расширенное заседание кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» УрГУПС (Екатеринбург, 2022).

Публикации. По теме исследования опубликовано десять печатных работ, в том числе четыре работы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации, одна работа в издании, индексируемом в международных базах данных Scopus. Получены: один патент на изобретение и одно свидетельство о государственной регистрации программы для электронных вычислительных машин.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 210 страницах, содержит 166 страниц основного текста, 89 рисунков, 21 таблицу и 6 приложений на 17 страницах, список использованной литературы составляет 194 наименование.

Глава 1 Вопросы организации участков извещения к объектам железнодорожной инфраструктуры

1.1 Анализ существующего метода расчета параметров работы переездной сигнализации

Повышение пропускной и провозной способностей железнодорожных линий, рост грузооборота [1] зависит от технического развития систем обеспечения движения поездов и качества управления технологическими процессами [2, 3]. Система управления движением поездов (СУДП) рассматривается как единый комплекс (рис. 1.1). С одной стороны, СУДП включает в себя элементы систем интервального регулирования движением поездов (СИРДП): системы диспетчерской централизация (ДЦ), электрической централизация (ЭЦ) автоблокировки (АБ), диагностики и мониторинга (СТДМ), с другой стороны, тесно связана с техническими средствами локомотивных бортовых устройств и других смежных хозяйств: элементами тягового и нетягового электроснабжения, системами технического обслуживания и ремонта подвижного состава и др.

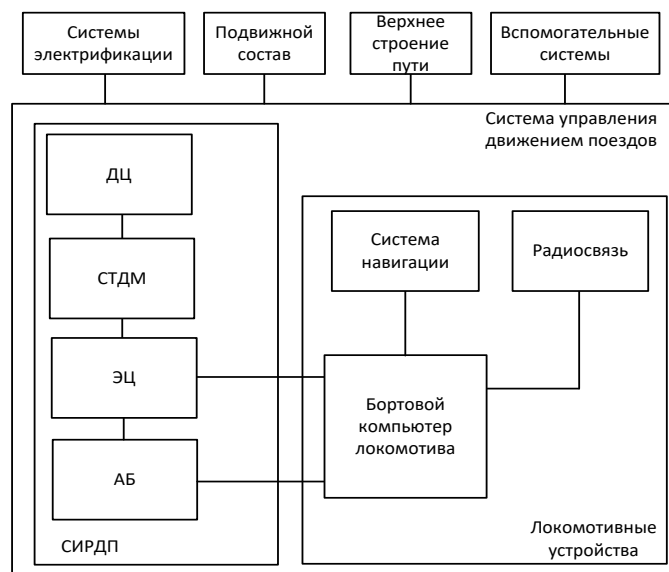


Рисунок 1.1 – Элементы системы управления движением поездов

В то же время важным вопросом является обеспечение потребных возрастающих показателей перевозок организационными мерами не требующих значительных капиталовложений и длительных сроков выполнения строительства и модернизации существующей инфраструктуры. На всем протяжении железнодорожной сети Российской Федерации используется смешанный тип движения: грузовые и пассажирские поезда, имеющие различные технические и ходовые характеристики, сообщение которых осуществляется по одним и тем же железнодорожным линиям. Стоит отметить, что рациональным решением, позволяющим снизить издержки по содержанию и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, может быть разделение грузовой и пассажирской составляющих по принципу «масса – скорость» [4].

Поэтому актуальной задачей является необходимость в повышении эффективности использования существующей инфраструктуры и проведении организационно-технических мероприятий, позволяющих увеличить показатели эксплуатационной работы железных дорог путем совершенствования существующих методов и принципов построения устройств и средств СИРДП и применения инновационных технических решений в области железнодорожной автоматики и телемеханики [5].

Вследствие повышения диапазона скоростей движения поездов актуальной становится задача совершенствования методов и алгоритмов автоматизации управления в части изменений временных параметров функционирования железнодорожных систем и устройств ЖАТ [6]. Ввиду того, что длительность осуществления технологических операций на железнодорожном транспорте являются основной характеристикой качества управления движением поездов [7], работа устройств ЖАТ, при которой допускается как избыточная, так и недостаточная пропускная и перерабатывающая способности, может привести к экономическим потерям [8].

Проектирование и строительство инфраструктуры объектов железнодорожного транспорта производится согласно принятой обязательной нормативно-технической документации [9], на основании которой

устанавливаются и рассчитываются параметры функционирования, и временные зависимости устройств ЖАТ. Стоит отметить, что расчет производится аналитическими методами, без математического обоснования и учёта характеристик транспортного потока. Это в свою очередь может приводить к неточностям в определении моментов времени реализации команд управления техническими средствами, которые используются для регулирования и обеспечения безопасности движения поездов. К числу таких технологических процессов управления на железнодорожном транспорте можно отнести: определение моментов времени для своевременного приготовления маршрутов для поездов различных категорий с целью обеспечения оптимального межпоездного интервала [32], определение времени подачи извещения о приближении к переезду, управление скоростью скатывания отцепа на сортировочных горках и др.

За последние 20 лет проведено большое количество исследований, посвященных анализу функционирования железнодорожных переездов как с точки зрения обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта, так и с точки зрения экономических, социальных и экологических последствий задержки автотранспортных средств на пересечении с железнодорожной линией [10, 11].

Технические мероприятия по повышению безопасности и снижению аварийности на железнодорожных переездах подробно описаны в работах отечественных авторов Д.В. Ефанова [12] В. Л. Геруса [13], Л.В. Птушкиной [14], А.И. Ганичева [15]. Вопросы обеспечения безопасности автомобильного транспорта на переезде и построения устройств ограждения изложены в трудах Н. П. Чех [16], Д. Е. Минакова [17] и др.

Разработкой методов оценки уровня безопасности железнодорожных переездов на основе построения вероятностных моделей занимались ученые А. И. Годяев [18], Н. А. Тарадин [19], исследованиями происшествий на железнодорожных переездах с точки зрения экономических и социальных потерь освещены в работах С. Т. Гатауллина [20] и др [21].

Вопросы совершенствования устройств ЖАТ в части контроля проследования поезда через переезд, поднимались в научных трудах авторов В. П. Мохонько [22], Е. Г. Моисеева [23], В. А. Сисина [24], Е. М. Тарасова [25], А. М. Трунаева [26] и др.

Технические решения, посвященные организации контролируемых железнодорожных участков на основе индуктивных датчиков колеса системы счета осей, изложены в работах таких ученых, как И. Г. Тильк [27], В. В. Ляной [28], В. В. Гнитько [29], С. А. Щиголев [30] и др.

Способы совершенствования методов и алгоритмов автоматизации управления переездной сигнализацией, в том числе с учетом высокоскоростного движения предложены в работах А. Б. Никитина [31], С. Т. Болтаева [32] и др.

Для заблаговременной подачи извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду и автоматического управления переездной сигнализацией, устройствами заграждения железнодорожного переезда и шлагбаумами, предполагается организация участка извещения перед переездом. Длина такого участка железнодорожного пути рассчитывается исходя из времени подачи извещения на переезд.

Под временем извещения на переезд понимается время, необходимое самому медленному транспортному средству максимальной длины для гарантированного проследования железнодорожного переезда при вступлении его на пересечение с железнодорожными путями до подхода поезда по любому железнодорожному пути, независимо от специализации железнодорожных путей и установленного направления [33, 34]. Таким образом, расчетное время извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду зависит от параметров проезжей части автомобильной дороги в границах железнодорожного переезда. При этом расчетное время извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду должно соответствовать следующим условиям:

- $t_n^{\text{АПС}} \geq 30$ с. – при автоматической переездной сигнализации;
- $t_n^{\text{опов}} \geq 40$ с. – при оповестительной переездной сигнализации;

- $t_{\text{и}}^{\text{УЗП}} \geq 45$ с. – при оборудовании переезда устройствами заграждения железнодорожного переезда.

К независимым переменным при расчете параметров работы переездной сигнализации относят следующие величины:

$l_{\text{пер}}$ – длина переезда, м;

V_{max} – заданная максимальная установленная скорость движения железнодорожного подвижного состава по участку приближения к переезду, км/ч.

Расчетные параметры работы переездной сигнализации определяются исходя из зависимостей:

$$t_{\text{и}}^{\text{р}} = f(l_{\text{пер}}) + t_{\text{пр}} + t_{\text{г}}, \text{ при } t_{\text{и}}^{\text{р}} \geq t_{\text{и}}^{\text{АПС}} (t_{\text{и}}^{\text{оп}}, t_{\text{и}}^{\text{УЗП}}); \quad (1.1)$$

$$l_{\text{и}}^{\text{р}} = f(V_{\text{max}}, t_{\text{и}}^{\text{р}}), \quad (1.2)$$

где $t_{\text{и}}^{\text{р}}$ – расчетное время извещения о приближении железнодорожного подвижного состава к переезду, сек.;

$l_{\text{и}}^{\text{р}}$ – расчетная длина участка извещения к железнодорожному переезду, м;

$t_{\text{пр}}$ – время срабатывания устройств переездной автоматики, сек.;

$t_{\text{г}}$ – гарантийное дополнительное время, сек.

Также, согласно Указанию «Об изменении времени извещения о приближении поезда к переезду при оборудовании переезда УЗП», при проектировании устройств автоматической переездной сигнализации необходимо учитывать, что время подачи извещения на переезд с устройствами заграждения переезда (УЗП) должно быть не менее 45 сек. Исходя из проведенного анализа зависимостей времени извещения о приближении поезда от длины переезда выявлено, что принятое фиксированное время подачи извещения на переезд является избыточным по отношению к расчетным значениям для переездов длиной менее 30 м (рис. 1.2).

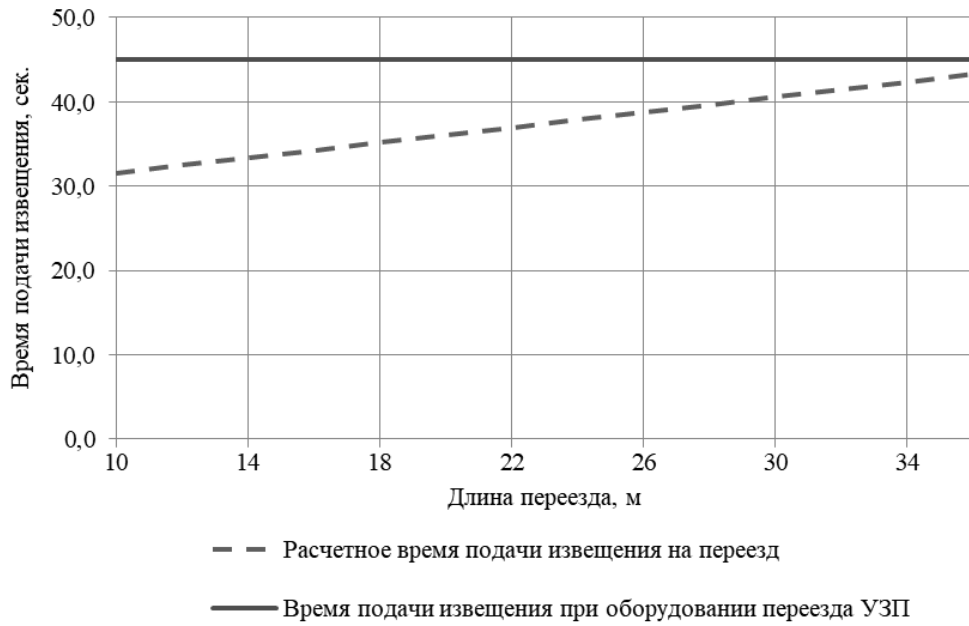


Рисунок 1.2 – Зависимость расчетных значений времени подачи извещения о приближении поезда на переезд от длины переезда

Таким образом, для обеспечения принятого условия времени подачи извещения ($t_{и} \geq 45$ сек.) необходимо предусматривать существенное удлинение участков извещения к переезду (рис. 1.3).

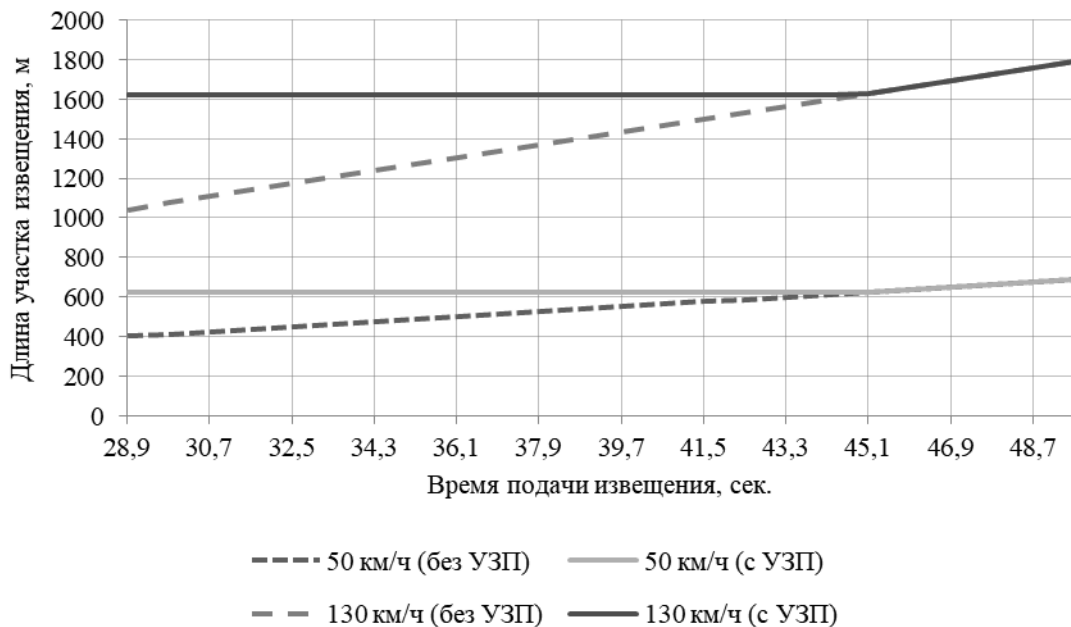


Рисунок 1.3 – Разница в расчетных длинах извещения при оборудовании переезда устройствами УЗП

Стоит отметить, что при проектировании систем управления переездной сигнализации как на существующих железнодорожных линиях, так и при новом

строительстве, реальные значения длин участков извещения в большинстве случаев отличаются от расчетных (рис. 1.4). При этом в качестве устройств контроля свободы пути и средств слежения за движением поездов на сети железных дорог применяются технические решения на основе электрических рельсовых цепей (РЦ) в составе систем централизации и блокировки, и индуктивных датчиков колеса систем счета осей (ССО) [35 – 38].

Поэтому в качестве зависимых параметров работы переездной сигнализации вводятся величины:

$t_{\text{и}}^{\text{ф}}$ – фактическое время извещения о приближении железнодорожного подвижного состава к переезду, сек.;

$l_{\text{и}}^{\text{ф}}$ – фактическая длина участка извещения к железнодорожному переезду, м.

Величина фактической длины участка извещения определяется на основе длин рельсовых цепей $l_i^{\text{РЦ}}$ участка приближения к переезду.

$$l_{\text{и}}^{\text{ф}} = \sum_i l_i^{\text{РЦ}} \geq l_{\text{и}}^{\text{р}}, \quad (1.3)$$

$$t_{\text{и}}^{\text{ф}} = t_{\text{и}}^{\text{р}} + \frac{(l_{\text{и}}^{\text{ф}} - l_{\text{и}}^{\text{р}}) \cdot 3,6}{V_{\text{max}}}, \quad l_{\text{и}}^{\text{ф}} > l_{\text{и}}^{\text{р}}. \quad (1.4)$$

Согласно методическому указанию И-276-00 «Расчет параметров работы переездной сигнализации» для определения временных параметров работы переездной сигнализации в расчетах указывается условие $\Delta t_{\text{и}} = t_{\text{и}}^{\text{ф}} - t_{\text{и}}^{\text{р}} \leq 20$ сек., при котором допускается превышение расчетного значения времени извещения не более чем на 20 сек. Данное условие приводит к тому, что на участках с установленной максимальной скоростью движения поездов V_{max} более 100 км/ч, разница между значениями расчетных и фактических длин участков извещения может достигать величины равной $\Delta l_{\text{и}} = l_{\text{и}}^{\text{ф}} - l_{\text{и}}^{\text{р}} \approx 700$ м.

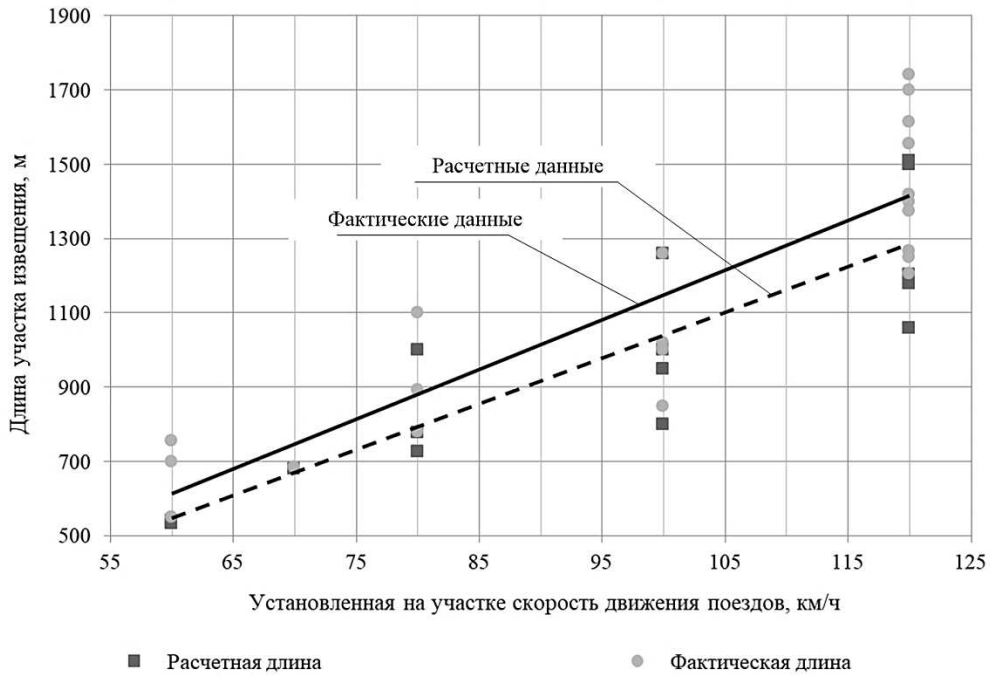


Рисунок 1.4 – Сравнение фактических и расчетных значений длин участка извещения на существующих переездах

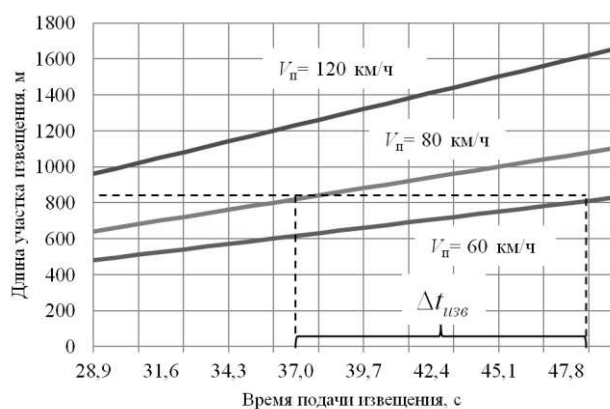
На основании вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что расчет параметров работы автоматической переездной сигнализации производится с рядом существенных допущений [39]:

- расчет основывается на максимальной установленной на участке скорости движения поездов (до 140 км/ч);
- уменьшение значения скорости движения поездов принимается мгновенным;
- увеличение значения скорости движения поездов задаётся согласно условию равноускоренного движения для локомотивов с тепловозной тягой – с ускорением $0,6 \text{ м/с}^2$, при электротяге – $0,8 \text{ м/с}^2$;
- для расчета длины участка извещения принимается маршрут с наименьшим временем движения до станционного переезда;
- не учитывается возможность увеличения скорости движения поезда на прямых участках при наличии в установленном маршруте стрелочных участков;
- допускается разница между расчетным временем подачи извещения и фактическим на величину до 20 сек.;

- не учитываются длины поездов, обращающихся на участке.

Стоит отметить, что существующий подход к расчету параметров работы АПС не допустим в условиях широких диапазонов скоростей движения поездов на участке. Существенное различие между реальными скоростями движения поезда и значением скорости, принятой для расчетов, приводит к увеличению разности времени подачи извещения. Так, если скорость поезда составляет 60 км/ч, а установленная скорость для расчета параметров работы АПС принята 80 км/ч, то фактическая длительность извещения увеличивается на 30 % ($\Delta t_{\text{изв}} \approx 11$ секунд) (рис. 1.5, а). Таким образом, и расчетная длина участка извещения становится избыточной по отношению к расчетному времени извещения и фактической скорости движения поезда. Разница $\Delta l_{\text{изв}}$ между фактической длиной участка извещения и длиной, рассчитанной с учётом текущей скорости движения поезда на приближении к переезду, может достигать 50 % (рис. 1.5, б).

а)



б)

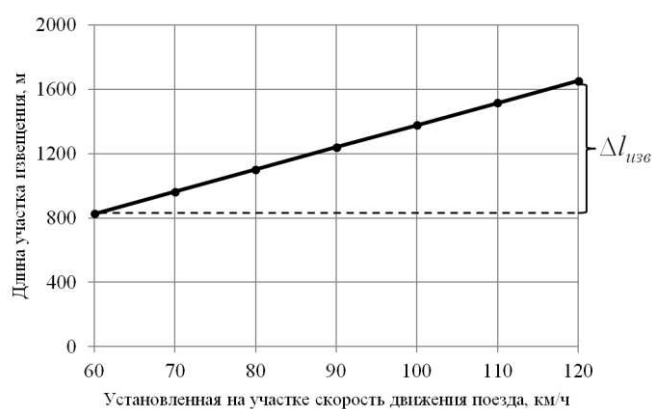


Рисунок 1.5 – Расчетные параметры работы АПС при различных скоростях движения поезда: а – разность значений времени подачи извещения на переезд $\Delta t_{\text{изв}}$; б – разность значений длины участка извещения $\Delta l_{\text{изв}}$

Поэтому с точки зрения обеспечения оптимальных временных зависимостей при подаче извещения на переезд и сокращения длительности закрытого состояния устройств переездной сигнализации необходимо совершенствовать методы управления устройствами АПС, учитывающие параметры движения приближающегося к переезду поезда.

1.2 Управление технологическими процессами железнодорожного транспорта на основе информации о параметрах движения подвижного состава

Примером динамических технических систем, в которых качественное управление транспортными процессами обеспечивается регулированием параметров работы устройств, являются системы горочной автоматики на сортировочных станциях [40]. Техническая реализация процесса расформирования - формирования составов включает в себя подсистемы для управления скоростью надвига и роспуска вагонов, маршрутами скатывания отцепов с горки, скоростью движения отцепов по спускной части и сортировочным путям [41]. Также при построении систем автоматизации на горках учитывается ряд факторов, влияющих на показатели процесса роспуска вагонов: погодные условия, сопротивление движению отцепа, сопротивление от кривых в пути, количество стрелок по маршруту следования отцепа, необходимая дальность пробега отцепа, весовая категория и длина отцепа, скорость и ускорение скатывания отцепа, ходовые свойства вагонов.

В процессе скатывания отцепов первоначальный интервал между скатывающимися с горки отцепами зависит от скорости роспуска и может значительно меняться на всём протяжении движения [42]. При этом возникает разность во времени прохождения отцепами участков и появляется опасность нагона одних отцепов другими. Для исключения нагона отцепов применяют интервальное регулирование. При установленной скорости выхода отцепа с тормозной позиции, кроме расчетных скоростей по прицельному регулированию, учитываются также изменение скорости и на спускной части горки, определяющее скорость роспуска, местонахождение отцепов, ходовые характеристики отцепов и т.д.

Основным средством контроля занятости участков пути на сортировочных горках являются рельсовые цепи. Однако в силу определенной специфики процесса расформирования и формирования составов также применяются

технические решения, обеспечивающие дополнительный контроль следования подвижных единиц и измерение характеристик движения, такие как, например, индуктивные датчики колеса, доплеровские измерители скорости и др.

Безопасность и быстрдействие процесса пропуска составов с горки в значительной мере определяется длиной горочного стрелочного участка l_{cy} , причем, чем меньше длина, тем выше скорость роспуска [43].

Перевод горочной стрелки под отцепом предотвращается исключительно путем контроля занятости стрелочных участков:

$$l_{cy} = l_{nc} + l_{kc}, \quad (1.5)$$

где l_{nc} – длина участка перед стрелкой (от начала РЦ до остряка), м;

l_{kc} – длина участка после стрелки (от начала остряка до конца РЦ), м.

Участок перед стрелкой необходим для обеспечения полного перевода стрелки до вступления отцепа на остряк. Длина этого участка зависит от скорости движения отцепа v_o , времени перевода стрелки t_{nc} и времени срабатывания путевых устройств t_{cp} , фиксирующих вступление отцепа на участок [44, 45]:

$$l_{nc} = f(v_o, t_{nc}, t_{cp}). \quad (1.6)$$

Для эффективной сортировочной работы на механизированных горках длительность времени перевода стрелки не должна превышать значение 0,6 секунд. При этом необходимо обеспечить изменение положения стрелки в интервалах следования отцепов [46].

В случае, когда скорость отцепа превышает допустимую по условиям безопасности расчетную скорость движения по стрелочному участку, перевод или автовозврат стрелки будет заблокирован.

Таким образом, минимальный возможный временной интервал следования отцепов определяется временем, необходимым на перевод стрелки и освобождение стрелочного участка скатывающимся отцепом:

$$t_{инт}^{min} = \frac{l_{cy} + l_{\sigma}}{v_o^{min}} + t_{nc} + 2 \cdot t_{cp}, \quad (1.7)$$

где l_6 – база расчетного вагона, м;

v_o^{\min} – минимальная расчетная скорость движения отцепа по стрелочному участку, м.

Для регулирования скорости скатывания вагонов предусматривается три тормозные позиции, с помощью которых возможна корректировка скорости выхода отцепа после тормозной позиции. Включая случаи, когда необходимо обеспечить допустимый интервал между отцепами с разной дальностью пробега, при котором скорость выхода с тормозной позиции для одного отцепа может быть больше скорости движения по спускной части горки впередиидущего отцепа и разделение этих отцепов происходит на последней разделительной стрелке. К тому же непрерывное измерение параметров движения отцепа с помощью радиолокационных измерителей, устанавливаемых на участках приближения к тормозным позициям, позволяет обеспечить поддержку постоянной допустимой величины интервала между отцепами ($T_{\text{инт}} \geq t_{\text{инт}}^{\min}$). Если фактическая скорость входа на тормозную позицию отцепа превышает заданную скорость выхода, при котором интервал следования впередиидущим отцепом меньше допустимого ($T_{\text{инт}} < t_{\text{инт}}^{\min}$), то формируется команда на включение режима торможения замедлителя.

Помимо реализации интервального регулирования движения отцепов на основе измеренных параметров движения, горочные информационно-измерительные устройства позволяют также определить следующие характеристики [47]:

- оптимальная скорость роспуска;
- скорость выпуска отцепа с тормозной позиции;
- местоположение отцепов на путях сортировочного парка;
- момент отрыва отцепа;
- координата прицельного торможения отцепа.

К тому же в подсистеме управления скоростью скатывания отцепов реализован алгоритм адаптивного управления замедлителями, при котором

оценивается текущее состояние устройства и рассчитывается время затормаживания и отмораживания отцепов. Применение методов прогнозирования движения отцепов на спускной и парковой частях горки, алгоритмов адаптивного торможения обеспечивают безопасность функционирования горочных устройств, сохранность вагона и груза, энергосбережение и увеличение срока эксплуатации тормозных средств.

Таким образом, с помощью применяемых современных комплексных технических средств автоматизации в полной мере может быть решена задача согласованности процессов регулирования, обеспечение необходимых временных зависимостей работы устройств ЖАТ и безопасности условий движения поездов. Применение средств контроля фактических параметров движения подвижных единиц (скорость, ускорение, местоположение, ходовые свойства) позволяют в значительной степени повысить качество регулирования технологическими процессами на железнодорожном транспорте.

1.3 Выбор целевого показателя для оценки функционирования железнодорожного переезда

На сегодняшний день актуальной задачей является снижение риска возникновения транспортных происшествий на железнодорожном транспорте, а также минимизация вероятности возникновения угрозы жизни и здоровью людей, имуществу и окружающей среде [48].

На основе данных о транспортных происшествиях на переездах [49, 50] выявлено, что основной причиной столкновений железнодорожного и автомобильного транспорта в зоне переездов является игнорирование и нарушение правил безопасности движения на переезде, в том числе выезд автомобильного транспорта на железнодорожные пути при закрытом исправном состоянии переездной сигнализации, шлагбаумов и заградительных устройств.

Для решения задач в области обеспечения безаварийного движения владельцами инфраструктуры общего и необщего пользования сети железных дорог разрабатываются мероприятия по внедрению более совершенных и эффективных технических решений, отвечающих возрастающим требованиям в обеспечении безопасности перевозок грузов и пассажиров.

Известно, что потери от простоя автотранспорта на переезде пропорциональны квадрату времени задержки [51]:

$$\bar{t}^2 = \int_0^{V_{\max}} \frac{S^2(V)}{V^2} f(V) dV, \quad (1.8)$$

где $S(V)$ – функция, описывающая кривую регулирования;

V – скорость поезда на участке, м/с;

$f(V)$ – функция вероятностного распределения значений скорости движения поезда на участке.

С другой стороны, время задержки автомобильного потока на переезде зависит как от параметров потока движения поездов по участку [52], так и от параметров работы устройств переездной сигнализации.

Потеря времени на переезде, без учета размера движения автотранспорта, пропорциональна времени пребывания переезда в закрытом состоянии:

$$T_{\text{закр}} = T_{\text{осв}} + t_{\text{АПС}}, \quad (1.9)$$

где $T_{\text{осв}}$ – время от занятия участка извещения к переезду до полного освобождения участка удаления одного поезда по одному пути следования, сек.;

$t_{\text{АПС}}$ – время выключения автоматической переездной сигнализации (время срабатывания приборов извещения и управления переездной сигнализацией) и открытия переезда для проезда автотранспорта, принято равным 15 сек.

Поэтому в качестве целевого показателя оценки функционирования железнодорожного переезда в работе выбрано значение времени закрытого состояния переезда.

В рамках решения задачи оптимизации целевую функцию, подлежащую минимизации, можно представить в виде разности между фактическим и расчетным временем закрытого состояния переезда:

$$(T_{\text{закр}}^{\text{ф}} - T_{\text{закр}}^{\text{р}}) \rightarrow \min, \quad (1.10)$$

где $T_{\text{закр}}^{\text{р}}$ – суммарное время закрытого состояния переезда при расчетных параметрах работы переездной сигнализации за заданный промежуток времени, сек.;

$T_{\text{закр}}^{\text{ф}}$ – суммарное время закрытого состояния переезда при фактических параметрах работы переездной сигнализации за заданный промежуток времени, сек.

Фиксированная длина фактического участка извещения к переезду является значительным недостатком в работе АПС. Поскольку в реальных условиях поезда следуют со скоростью значительно ниже установленной на участке, в большинстве случаев переезд закрывается преждевременно, что приводит к существенной разнице между величинами $T_{\text{закр}}^{\text{р}}$ и $T_{\text{закр}}^{\text{ф}}$, вычисленными в течение заданного промежутка времени (например, в течение суток).

Существенным эксплуатационным недостатком всех действующих систем автоматической переездной сигнализации является фиксированная длина участка извещения, рассчитанная, как указано выше, исходя из установленной максимальной скорости движения поездов на участке. Однако в реальных же условиях поезда по участку следуют с меньшей скоростью и, в подавляющем большинстве случаев, переезд закрывается преждевременно, в результате чего длительность времени закрытого состояния переездной сигнализации увеличивается. В работах авторов [53, 54] подтверждено, что основными мероприятиями, позволяющими минимизировать простой автотранспорта у переезда являются:

- уменьшение фактической длины участка извещения;
- управление устройствами автоматической переездной сигнализацией по параметрам движения поезда.

Уменьшение фактической длины участка извещения предполагает переоборудование участков пути перед переездом короткими рельсовыми цепями, тем самым обеспечивая равенство фактической длины участка извещения к расчетной ($l_n^{\phi} = l_n^p$). Вместе с тем на железнодорожных путях необщего пользования, где отсутствует возможность обустройства рельсовой цепи, участки приближения к железнодорожным переездам оборудуются устройствами счета осей, которые так же позволяют сократить разницу между расчетным и фактическим значениями длин участка извещения. Поэтому возможно применение систем счета осей в качестве резервного по отношению к рельсовым цепям средства контроля свободности участков пути на приближении к переезду.

Стоит отметить, что подобные мероприятия по переустройству существующих путевых участков для соответствия условию равенства фактических и расчетных длин участков извещения требуют значительных капиталовложений.

С другой стороны, в работах [55, 56] поднимается вопрос обеспечения безопасности движения поездов на переездах в случае возникновения препятствий или аварийных ситуаций на пересечении с автодорогой (остановившийся автотранспорт, развалившийся груз и т. д.). Теоретически подтверждено, что существующие методы расчета участков извещения переездной сигнализации не обеспечивают возможности остановки поезда торможением перед переездом после его закрытия в случае необходимости.

Возможные мероприятия, позволяющие снизить вероятности столкновений на переездах [57, 58]:

- оборудование переезда устройствами обнаружения препятствий;
- увеличение длины участка извещения;
- уменьшение скорости поезда на участке приближения к переезду;
- совершенствование средств торможения поезда;
- управление устройствами автоматической переездной сигнализацией по характеристикам и параметрам движения поезда.

Таким образом, актуальным вопросом исследования также является совершенствование методов и средств управления устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики и систем интервального регулирования движения поездов с учетом фактических параметров движения поезда и его характеристик [59, 60]. В том числе разработка адаптивных алгоритмов управления параметрами работы переезда и самонастраивающихся систем управления устройствами автоматической переездной сигнализации, совершенствование путевых датчиков и устройств, предоставляющих информацию о наличии и местонахождении подвижных единиц и методов определения фактических параметров движения поезда. Наряду с этим при разработке и модернизации систем управления устройствами переездной сигнализации должно быть обеспечено соответствие следующим требованиям:

- устройства АПС должны переходить в закрытое состояние автоматически при следовании поезда по участку извещения любого пути перегона независимо от установленного направления движения;
- на участках приближения к переезду обеспечить передачу информации о параметрах поезда по любому пути перегона независимо от установленного направления движения;
- обеспечить контроль направления движения поезда на участках приближения к переезду по любому пути перегона независимо от установленного направления движения;
- исключить открытие переезда при передвижениях на участках извещения к переезду специальных самоходных железнодорожных подвижных составов.

1.4 Анализ средств измерения параметров движения подвижного состава

В настоящее время измерение параметров движения поезда на контролируемых участках можно осуществить дискретными и непрерывными методами (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Существующие способы определения скорости подвижного состава

Дискретный метод предполагает установку точечных напольных устройств на контролируемом участке. По времени реакции подобных датчиков при прохождении над ними поезда можно определить координату, скорость и ускорение движущегося объекта. При известной разности координат Δx_i , пройденным поездом за определенное время Δt , скорость $V_i(t)$ и ускорение $a_i(t)$ определяются из известных соотношений:

$$V_i(t) = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t}; \quad (1.11)$$

$$a_i(t) = \frac{V_i(t) - V_{i-1}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta V_i}{\Delta t}. \quad (1.12)$$

Однако устройства, с помощью которых осуществляется дискретное измерение параметров движения, обладают следующими недостатками:

- малая информационная емкость;
- значительный промежуток времени дискретизации;

- имеет место мешающее влияние тягового тока и атмосферных перенапряжений на напольное оборудование устройств [61].

К существующим средствам, позволяющим непрерывным методом определить параметры движения поезда, можно отнести:

- рельсовые цепи;
- радиолокационные устройства;
- системы спутниковой навигации (СНС);
- системы бортовой одометрии.

В системах ЖАТ РЦ является наиболее распространенным устройством, предоставляющее информацию о наличии и местонахождении подвижных единиц.

Известно, что при движении поезда по участку, оборудованному РЦ, изменяются электрические параметры РЦ (напряжение U , ток I и фаза φ) [62] (рис. 1.7). Таким образом, РЦ можно использовать в качестве информационно-измерительного устройства для определения параметров движения поезда. Задача определения параметров движения сводится к нахождению зависимости некоторой функции, описывающей координаты подвижной единицы в каждый момент времени в зависимости от изменения входных и выходных параметров РЦ $X=\{U, I, \varphi\}$ [33, 63].

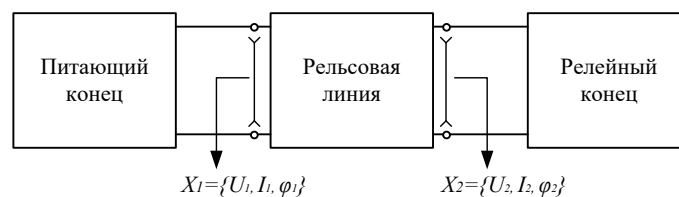


Рисунок 1.7 – Входные и выходные электрические параметры рельсовой цепи

Существенным недостатком подобных технических решений является влияние изменения сопротивления балласта пути на параметры РЦ. Также стоит отметить, что в абсолютном исчислении РЦ являются одни из самых энергоемких, дорогих и ресурсоемких средств информации, а напольная аппаратура РЦ требует наличия непрерывного электропитания, периодического обслуживания, регулировок и ремонта.

Широкое распространение на железнодорожном транспорте получили радиотехнические устройства, использующие радиолокационные принципы [64]. Эти устройства позволяют измерять скорость роспуска отцепов на сортировочной горке и скорость движения поезда, обнаруживать препятствия на железнодорожном полотне и переездах, определять наличие подвижных единиц на стрелочных переводах и тормозных позициях, выявлять степень заполнения подгорочных путей на сортировочных горках, считывать информацию с подвижного состава и т.п.

Принцип работы радиолокационных информационно-измерительных устройств можно описать общей структурной схемой, изображенной на рисунке 1.8. На вход приемника поступает два сигнала: отраженный от подвижного объекта и сигнал передатчика. В результате обработки и сравнении двух входных сигналов выделяется составляющая, которая несет информацию о доплеровской частоте и о скорости объекта.

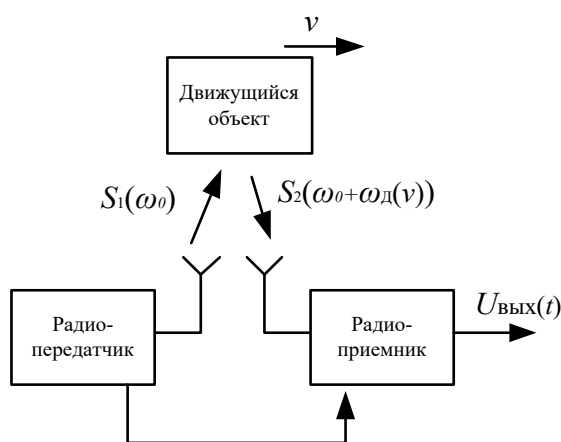


Рисунок 1.8 – Общая структурно-функциональная схема радиолокационных информационно-измерительных устройств

Сигнал на выходе приёмника описывается следующим выражением:

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вых}} \cos\left[\omega_0 t - \omega_0 \frac{2}{c}(R_0 + Vt) + \varphi_0\right], \quad (1.13)$$

где ω_0 , φ_0 – круговая частота и начальная фаза монохроматического переменного тока, создаваемого передатчиком, 1/с;

R_0 – расстояние до объекта, м;

c – скорость распространения электромагнитного поля, м/с;

V – скорость перемещения объекта, м/с.

Тогда определение скорости объекта сводится к измерению доплеровской частоты ω_d :

$$\omega_d = \mp \frac{2V}{c} \omega_0. \quad (1.14)$$

Недостатком радиотехнических устройств, применяемых на железнодорожном транспорте, является то, что они работают на малых расстояниях. Ввиду того, что антенны не обеспечивают одновременный обзор всей зоны наблюдения. Также стоит отметить, что погрешность измерения скорости доплеровским измерителем зависит от стабильности частоты излучаемого сигнала в диапазоне рабочих температур, точности установки частоты генератора СВЧ, ширины диаграммы направленности антенны, уровня подавления боковых лепестков антенн [65].

Наиболее точную оценку положения, скорости и пройденного расстояния движущегося подвижного состава можно осуществить подсистемой бортовой одометрии, например, с помощью датчика пути и скорости (ДПС). Принцип действия ДПС, устанавливаемого на буксе колесных пар локомотива, основан на преобразовании угла поворота колесной пары в последовательность электрических импульсов.

В работе [66] подтверждается, что колесная пара не является идеальным преобразователем угловой скорости в линейную и может вносить ошибки в измеренные значения параметров движения. В процессе измерения накапливается погрешность, вызванная проскальзыванием колеса относительно рельса, возможным юзом при торможении, движением в кривых, изменением радиуса колеса и конусностью бандажа. Также в области малых скоростей движения подвижного состава погрешность измерения в сторону завышения показаний может в отдельных циклах достигать предела измерения ДПС.

Стоит отметить, что коррекцию ошибок возможно осуществить напольными датчиками – точечными отметчиками, сигналами от которых производится сброс счетчика ДПС.

Однако в силу нерешенности ряда проблем, связанных с недостаточной точностью и нестабильностью измерений, функции бортовых устройств измерения параметров движения локомотива на основе осевых датчиков ограничены и, по существу, сводятся, как правило, к измерению и отображению в кабине машиниста фактической скорости движения [67].

Оборудование локомотивного парка техническими средствами, контролирующими и обеспечивающими безопасное движение поездов, таких как АЛС-ЕН, САУТ-ЦМ/НСП, КЛУБ привело к объединению подобных устройств и созданию безопасных локомотивных объединенных комплексов БЛОК. Подобные локомотивные комплексы нередко оборудованы спутниковой системой навигацией GPS/ГЛОНАСС. На основе координат, полученных с помощью позиционирования GPS/ГЛОНАСС, может быть решена задача определения параметров движения подвижной единицы.

На точность определения координат с помощью ССН существенное влияние оказывают ошибки, возникающие при выполнении процедуры измерений. Природа этих ошибок различна [68, 69]:

- неточное определение времени;
- ошибки вычисления орбит;
- инструментальная ошибка приемника;
- вторичные отражения сигнала спутника от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника;
- ионосферные и тропосферные задержки сигнала.

Другим фактором, сдерживающим применение GPS в качестве основной системы позиционирования, является необходимость в составлении карты местности, с учетом перевода абсолютной координаты в расстояние согласно прокладке железнодорожного пути. При определении местоположения используется алгоритм «кривая-кривая», который строится на вероятностной

модели ошибок спутниковой навигации. Данный алгоритм является сложным и основывается на сопоставлении нескольких точек, найденных по спутнику, точкам кривой электронной карты [70].

Недостатком подобных технических решений, основанных на измерении параметров и характеристик движения поезда локомотивными бортовыми устройствами, является необходимость в непрерывной передаче управляющих команд и вычисляемой информации удаленным объектам управления. Вследствие этого возникает задача в оснащении всех обращающихся поездов на участке радиопередающей аппаратурой и сооружении стационарных модулей цифровой радиосвязи [71].

В рамках исследования особый интерес представляют технические решения на основе технологии виброакустического мониторинга, а именно распределенного волоконно-оптического датчика. Использование оптических датчиков для решения задачи измерения характеристик движения подвижного состава позволяет избавиться от существенных недостатков, присущих рассмотренным в текущем разделе устройствам и системам контроля проследования поездов, и обеспечить требуемую точность измерения.

1.5 Выводы и постановка задач исследования

1. Существующий метод расчета параметров работы устройств переездной сигнализации не позволяет обеспечить оптимальных значений временных зависимостей при подаче извещения на переезд и длительности закрытого состояния устройств переездной сигнализации. Кроме этого в расчете не учитываются фактические параметры движения поездов, интенсивность движение железнодорожного и автомобильного транспорта в зоне железнодорожного переезда.

2. Дальнейшее совершенствование теории и практики проектирования переездных устройств автоматики должно основываться на методах, обеспечивающих минимальное, по условиям безопасности, времени закрытого состояния устройств переездной сигнализации. Однако для организации «плавающих» участков извещения к переезду, длина которых зависит от параметров движения поезда, необходимо непрерывное измерение и оценка значений скорости и ускорения движения подвижного состава.

3. В результате проведенного анализа технических решений в области железнодорожной автоматики и телемеханики, выделены недостатки существующих средств определения характеристик движения поезда и контроля свободности пути. Предложено применение оптических распределенных датчиков для решения задачи измерения параметров движения поезда на основе технологии виброакустического мониторинга.

Целью исследования является разработка методических и технических решений для систем управления автоматической переездной сигнализацией, обеспечивающих сокращение длительности закрытого состояния железнодорожного переезда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ методов расчета параметров работы переездной сигнализации, практики проектирования и построения системы автоматической переездной сигнализации и средств определения параметров движения поездов.

2. Разработать дискретно-событийную модель процесса функционирования железнодорожного переезда, позволяющую оценить параметры работы переездной сигнализации и определить минимальное, по условиям безопасности, время закрытого состояния переезда с учетом фактических данных о движении поездов по участку.

3. Разработать методы определения местоположения и скорости движущегося поезда на участке приближения к переезду на основе сигнала распределенного волоконно-оптического датчика для систем управления автоматической переездной сигнализацией.

4. Для оценки безопасности движения поездов на переезде разработать стохастическую модель функционирования железнодорожного переезда, учитывающую параметры работы переездной сигнализации и характеристики потоков железнодорожного транспорта и автотранспорта.

5. Разработать структуру устройства управления системой автоматической переездной сигнализации с учетом информации о параметрах движения поезда на участке приближения к переезду, на основе применения распределенных волоконно-оптических датчиков.

Глава 2 Разработка имитационной модели функционирования железнодорожного переезда

Глава посвящена разработке метода расчета и оценки условий работы переезда на основе статистических данных движения поездов. При этом предложено исследовать параметры работы переездной сигнализации на основе имитационного моделирования, учитывая размеры, категории и показатели движения поездов, как на однопутных железнодорожных линиях, так и на многопутных.

На основе теоретических результатов моделирования функционирования переезда разработана программа для расчета и оценки временных параметров АПС.

2.1 Постановка задачи по разработке модели

Взаимодействие транспортного потока с устройствами переездной сигнализации можно рассматривать как транспортный процесс, который подчиняется стохастическим закономерностям: неравномерность транспортного потока, неодинаковое время прохождения участков пути, случайный характер событий на транспорте и др. Для изучения подобных стохастических процессов применима теория массового обслуживания [72]. При этом описываемая система массового обслуживания характеризуется входным потоком, очередью и временем обслуживания.

В качестве анализируемых показателей моделируемого процесса выбраны временные характеристики функционирования автоматической переездной сигнализации T . Наряду с этим воздействие входного потока на параметры переездной сигнализации на однопутном участке железнодорожной линии описывается потоком Π (рис. 2.1, *a*), а длительность закрытого состояния переезда

зависит от значений скорости $V_{п}$, ускорения $a_{п}$ и длин $l_{п}$ заданных поездов $T(V_{п}, l_{п})$ в потоке.

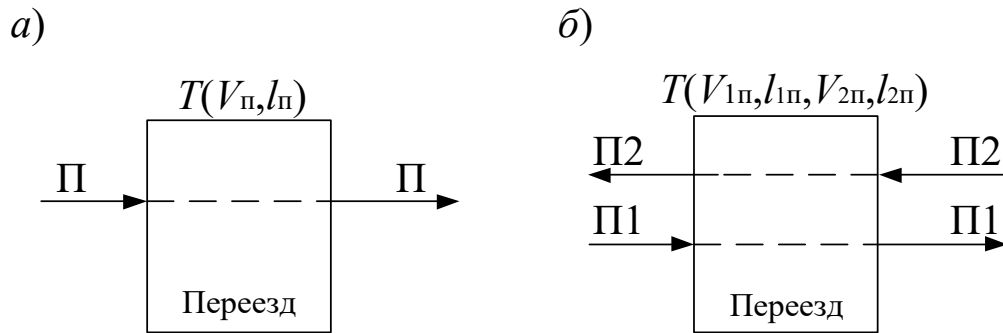


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия потока: *а* – однонаправленный одиночный поток; *б* – двунаправленные одиночные потоки

Однако описать функционирование системы с помощью одиночного потока поездов затруднительно, поэтому предлагается при построении модели учитывать классификацию поездов (рис. 2.2), в силу того, что длины составов, скоростей и тормозных характеристик различных категорий поездов существенно отличаются. Причем длительность функционирования автоматической переездной сигнализации для каждой категории поездов будет различно: $T_{пасс}$ – для потока, описывающего движение пассажирских поездов, $T_{груз}$ – грузовых и $T_{д}$ – прочих коротких подвижных единиц, в том числе поездов пригородного сообщения.

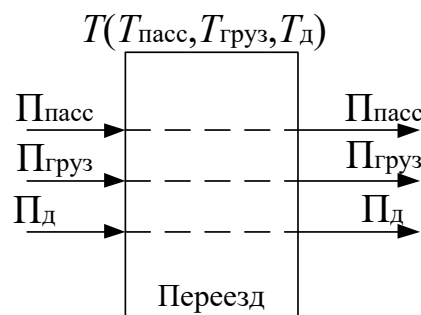


Рисунок 2.2 – Разнородный однонаправленный поток, описывающий поток движение пассажирских ($П_{пасс}$), грузовых ($П_{груз}$) и прочих ($П_{д}$) поездов

Таким образом, с точки зрения описания динамических систем, математическую модель процесса взаимодействия подвижного состава и устройств переездной сигнализации можно описать следующим выражением:

$$U = \langle T, X, T_{\text{инт}}, V_k, a_k, L_k, \varphi_{ij}^k \rangle, \quad (2.1)$$

- где T – множество, определяющее моменты времени;
- X – множество состояний моделируемой системы;
- $T_{\text{инт}}$ – множество, характеризующее величину межпоездного интервала;
- V_k – множество, характеризующее значения скорости k -той категории поездов на участке приближения;
- a_k – множество, характеризующее значения ускорения k -той категории поездов на участке приближения;
- L_k – множество, характеризующее значения длин k -той категории поездов;
- φ_{ij}^k – переходная функция состояний для k -го поезда. Причем переход из состояний i в состояние j в момент времени $t_{ij}^k \in T$ зависит от значений скорости, ускорения и длины k -го поезда: $t_{ij}^k(V_k, a_k, L_k)$.

Задачей разрабатываемой математической модели функционирования железнодорожного переезда является расчет временных зависимостей работы железнодорожного переезда. Из раздела 1 настоящей работы в качестве целевого показателя оценки переезда выбрана величина суммарного времени закрытого состояния устройств переездной сигнализации за исследуемый временной интервал. В рамках поставленной задачи при разработке математической модели необходимо учитывать порядок воспроизведения процессов описываемого объекта с сохранением последовательности их протекания во времени, параллельность течения событий и изменение поведения системы при изменении условий функционирования.

Разработка математической модели процесса взаимодействия транспортных потоков на одноуровневом пересечении железнодорожных путей и автомобильных дорог предусматривает формализацию системы управления переездной сигнализацией и элементов транспортной инфраструктуры. Для адекватного описания поведения системы и анализа временных параметров исследуемого объекта рационально использовать имитационное моделирование.

2.2 Формализованное описание процесса функционирования железнодорожного переезда

Модель функционирования системы автоматической переездной сигнализации для железнодорожного участка с учетом параметров движения поезда задается следующими исходными данными:

1. Максимальная допустимая скорость движения поездов на участке (V_{\max});
2. Длина участка извещения ($L_{\text{изв}}$);
3. Ширина ($S_{\text{пер}}$) и длина переезда ($L_{\text{пер}}$);
4. Скорость движения подвижного состава (V_k);
5. Ускорение подвижного состава (a_k);
6. Длина подвижного состава (L_k).

Зона железнодорожного переезда (рис. 2.3) задается участком извещения $L_{\text{изв}}$, длиной переезда $L_{\text{пер}}$, участком удаления $L_{\text{уд}}$. Также в расчете необходимо учитывать величину длины поезда L_k , которая определяет полное освобождение подвижным составом участка удаления и прекращение подачи извещения в устройства автоматической переездной сигнализации.

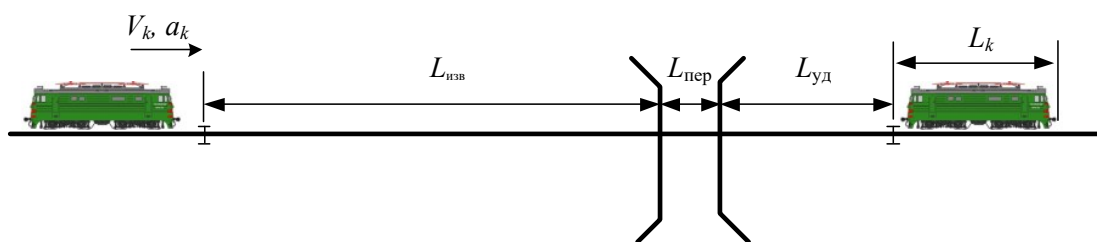


Рисунок 2.3 – Входных данных для построения модели функционирования переездной сигнализации

При приближении поезда к переезду задаются следующие фазы движения:

1. Движение на участке извещения;
2. Движение на участке пересечения с автодорогой;
3. Движение на участке удаления.

Величину ускорения поездов на участках переезда предлагается учитывать следующими способами:

1. На каждом участке в модели задаются начальная (V_H) скорость движения поезда в начале участка и конечная скорость конца участка (V_K), не превышающие разрешенной скорости на исследуемом железнодорожном участке. Согласно известным уравнениям, описывающим равноускоренное движение, величина времени t , за которое значение скорости V_H достигнет значения скорости V_K , равно:

$$t = \frac{V_K - V_H}{a}. \quad (2.2)$$

Величина ускорения a при этом, описывается выражением:

$$a = \frac{V_K^2 - V_H^2}{2L}. \quad (2.3)$$

Тогда время проследования участка равному длине участка извещения $L_{изв}$ определяется согласно выражению (2.2):

$$t_{изв} = \frac{2(V_K - V_H) \cdot L_{изв}}{(V_K^2 - V_H^2)}. \quad (2.4)$$

2. Введение в модель величины ускорения движения поездов, для каждой категории поездов. Согласно известному уравнению, которое связывает переменные перемещения s , скорости v_0 и ускорения a :

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \quad (2.5)$$

Перемещение поезда по участку извещения задается выражением $L_{изв} = s(t) - s_0$. Тогда выражение (2.5) принимает вид:

$$\frac{1}{2} a t^2 + v_0 t - L_{изв} = 0. \quad (2.6)$$

Решение для полученного уравнения, удовлетворяющее условию $t > 0$, $a \neq 0$, определяет время проследования участка извещения с заданной начальной скоростью v_0 и ускорением a :

$$t_{изв} = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2aL_{изв}}}{a}. \quad (2.7)$$

На основе вышеуказанных выражений определяется длительность движения объекта в исследуемых зонах переезда. Для описания перемещения поезда необходимо при расчетах также учитывать длину подвижного состава.

2.3 Разработка алгоритмов для определения длительности закрытого состояния переезда

Количественная оценка алгоритмов управления устройствами переездной сигнализации может быть определена на основе моделирования работы переездной сигнализации при проходе подвижного состава по моделируемому участку. Структура процесса расчетов в модели функционирования переезда при проезде подвижным составом зоны переезда представлена на рисунке 2.4. Основной задачей модели является определение длительности закрытого состояния железнодорожного переезда.



Рисунок 2.4 – Структура схемы, описывающая процесс определения длительности закрытого состояния переезда на однопутных и многопутных участках

Модель состоит из следующих этапов расчета: ввод исходных данных условий работы переезда и параметров движения поездов по участку, определение времени движения поезда по участку приближения, в зоне пересечения с автодорогой и участку удаления, расчет времени освобождения

поездом границ переезда и определение длительность закрытого состояния переезда.

В качестве исходных данных параметров работы переезда выделяются: длина и ширина переезда, фактические значения длин участков извещения и удаления, расчетное время подачи извещения на переезд, используемые устройства сигнализации и заграждения на переезде.

В качестве параметров движения поездов на участке учитываются категории поездов, обращающихся на исследуемом участке, значения длин, скорости и ускорения движения поездов, а также размеры движения по участку для каждого установленного направления движения.

На основании исходных данных модель формирует массив из вычисленных значений длительности закрытого состояния переезда.

Так, в случае исследования переезда на однопутном участке перегона, для определения искомого массива $T_{\text{закр}}[i..I]$ предлагается в качестве входных данных принять известные значения $V[i]$, $L[i]$ i -го поезда I -ой категории на участке перегона и фактические значения параметров переезда. Алгоритм вычисления длительности закрытого состояния переезда для указанных условий представлен на рисунке 2.5.

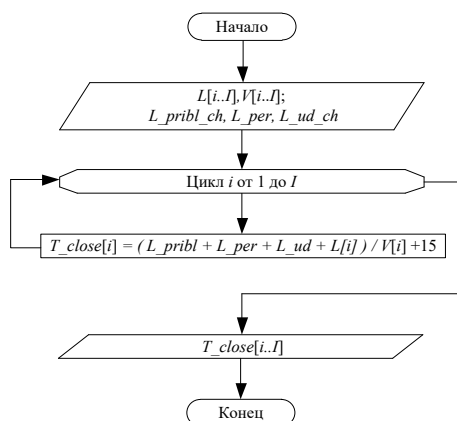


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритма определения длительности закрытого состояния переезда

В случае, если пересечение автодороги организовано с двумя и более железнодорожными путями, необходимо задать межпоездной интервал $T_{\text{инт}}$ для каждого пути двухпутного или многопутного железнодорожного участка.

Предлагаемый подход учитывает одновременное влияние на величину длительности закрытого состояния переезда встречных потоков поездов, движущихся по различным путям в границах переезда.

Ниже представлено описание расчета для переезда, расположенного на двухпутном участке перегона. Пусть размер движения железнодорожного транспорта в правильном четном направлении движения описывается i -ми поездами, а правильного нечетного направления – количеством k -ых поездов. Начальные данные для расчета: межпоездной интервал для каждого направления движения $T_{\text{инт}}[i]$, $T_{\text{инт}}[k]$, длины $L[i]$, $L[k]$ и скорости $V[i]$, $V[k]$ поездов задаются распределением соответствующих величин. Время движения по расчетным участкам пути в границах переезда (рис. 2.6) определяется на основании уравнения (2.5). Расчет расстояния с соседней станции $S^{\text{чет(нечет)}}$ до участка извещения к переезду принимается от ординаты начала первого участка удаления станции за входным светофором Н(Ч)Д соответствующего пути установленного направления движения поезда.

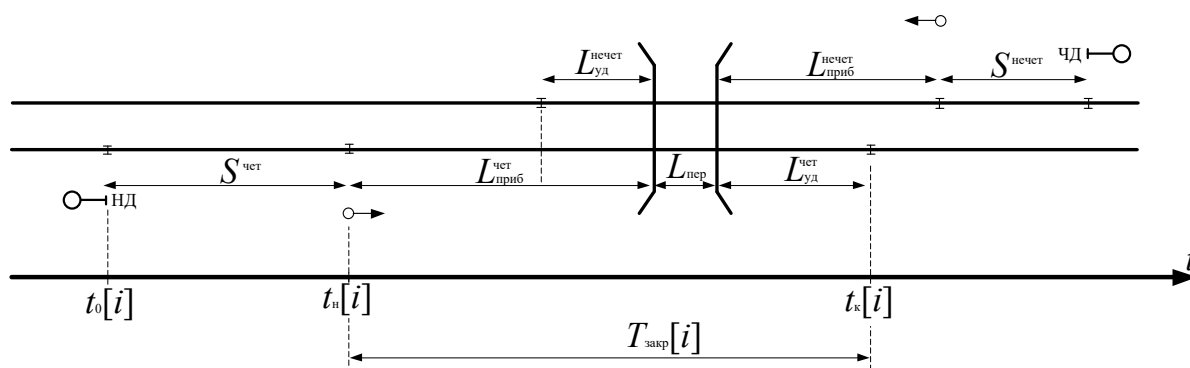


Рисунок 2.6 – Иллюстрация определения моментов времени фаз движения поезда

Моменты времени начала движения i -го поезда по участку извещения к переезду вычисляется по формуле:

$$t_n[i] = t_n[i-1] + T_{\text{инт}}[i-1], \quad i = 1 \dots I, \quad (2.8)$$

где $t_n[i]$ – момент времени начала движения i -го поезда по участку извещения.

Момент времени полного освобождения переезда i -ым поездом определяется как сумма момента времени начала движения по участку извещения и длительности закрытого состояния переезда:

$$t_k[i] = t_n[i] + T_{\text{загр}}[i], \quad (2.9)$$

где $t_n[i]$ – момент времени начала движения i -го поезда по участку извещения;

$t_k[i]$ – момент времени полного освобождения i -тым поездом зоны переезда.

Блок-схема алгоритма определения длительности закрытого состояния переезда с учетом интервала следования между поездами представлена на рисунке 2.7.

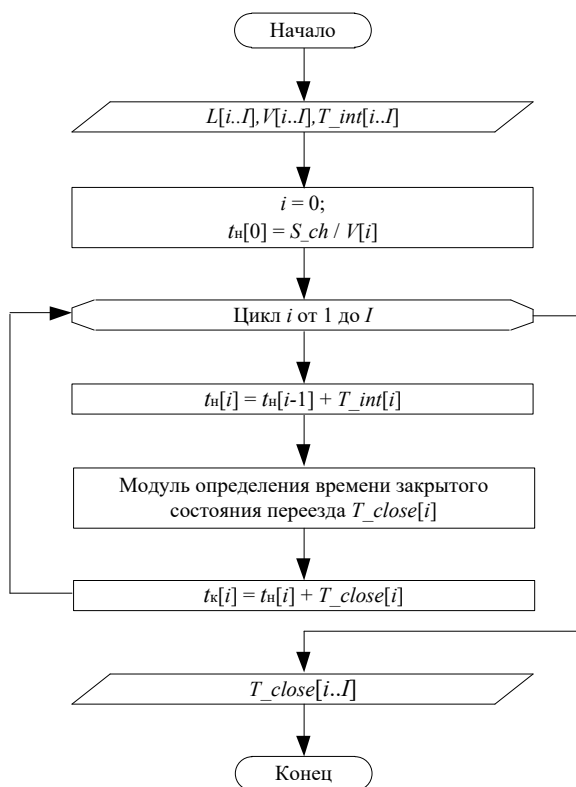


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма определения длительности закрытого состояния переезда с учетом интервала следования между поездами

Для учета одновременного занятия участков извещения к переезду при движении поездов по двухпутному участку необходимо сравнение моментов времени начала движения и освобождение зоны переезда i -го поезда четного направления движения с моментами времени k -го поезда нечетного направления движения. Блок-схема алгоритма, реализующего вычисление длительности времени закрытого состояния переезда на двухпутном участке, представлен на рисунке 2.8.

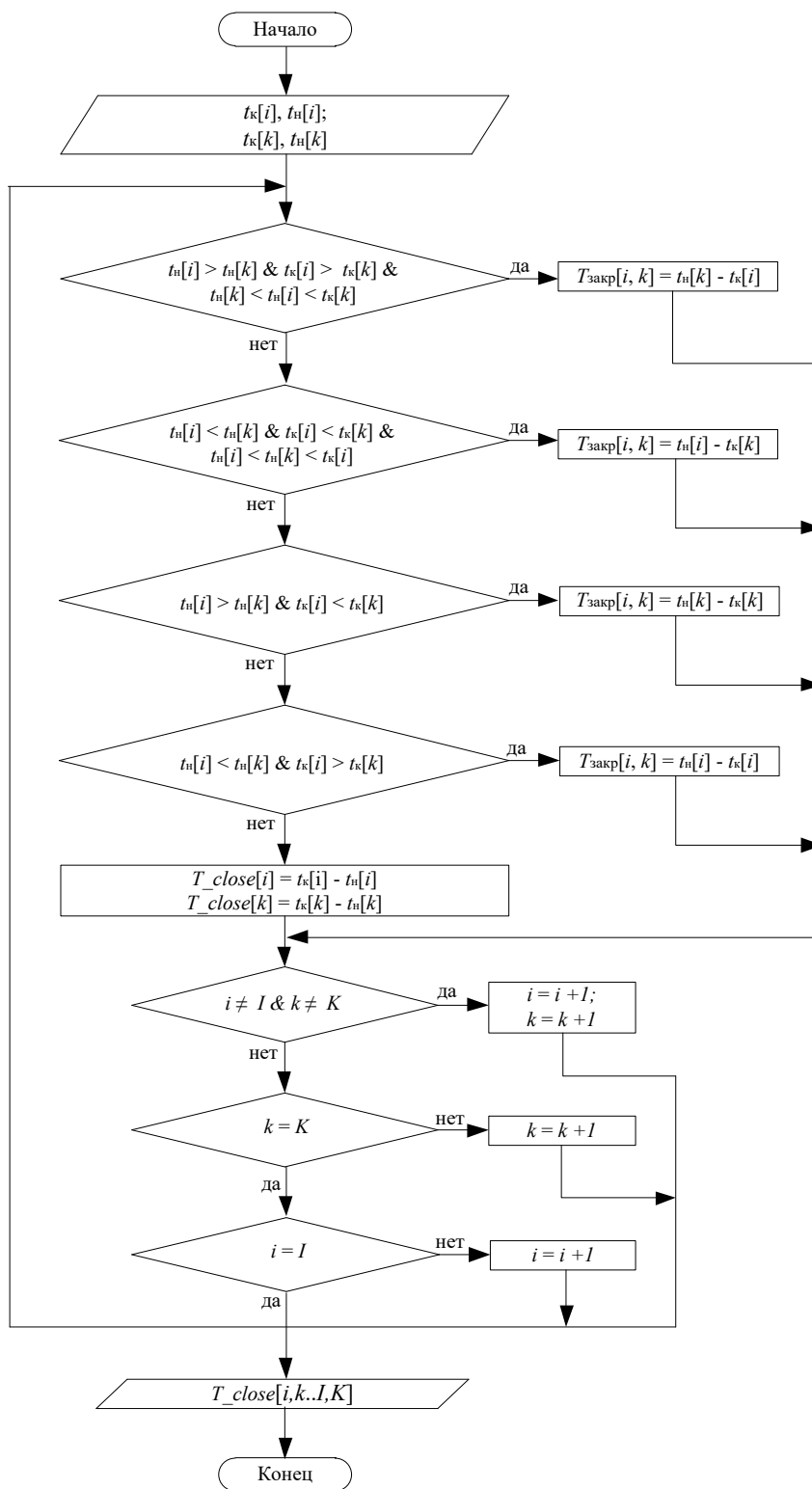


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритма определения длительности закрытого состояния переезда с учетом одновременного движения поездов по двухпутному участку в зоне переезда

2.4 Агент-ориентированный подход к построению имитационной модели

Поскольку на железнодорожном участке обращаются поезда различной категории с различными параметрами движения, массой и длиной, для более полного описания объектов железнодорожного транспорта необходимо выбрать и обосновать метод моделирования, при котором бы учитывались различия транспортных потоков.

В работе [73] предложено категорию поезда определять на основе случайного события, вероятность которого рассчитывается исходя из данных среднесуточного размера соответствующего потока. Количество вагонов и тип вагона в составе каждого поезда моделируется как дискретная случайная величина, закон распределения которой задан на основе данных натуральных листов прибывающих поездов.

В настоящей работе предлагается агент-ориентированный подход к построению имитационной модели функционирования железнодорожного переезда, при этом потоки поездов различной категории, поступающие в модель, задаются в виде агентных объектов с индивидуальными параметрами подвижного состава.

Агент-ориентированные модели (АОМ) относятся к классу моделей, основанных на взаимодействии множества объектов моделирования (агентов). Подобные модели обладают следующими свойствами:

- автономность агентов;
- неоднородность агентов;
- наличие большого числа взаимодействующих друг с другом агентов.

В качестве преимуществ можно выделить следующие моменты:

- возможность использования большого количества индивидуальных объектов;

- возможность построения моделей с учетом отсутствия знаний о глобальных зависимостях.

Последовательность развития процессов исследуемой системы железнодорожного переезда описывается структурной схемой дискретно-событийной модели (алгоритмом), представленной на рисунке 2.9.

Наборы агентов задают множество категорий поездов, обращающихся на исследуемом участке. Причем каждый агент задан эмпирическими распределениями величин скорости движения поездов, ускорения на участке извещения, длин поездов данной категории для каждого направления движением поездов.

С помощью блока «очередь» определяются условия следования попутных поездов, с возможностью задания пачечного, пакетного и частично-пакетного графика движения.

Блок «задержка» формирует очередность следования поездов на участке с величиной разграничения равному заданному значению межпоездного интервала $T_{\text{инт}}$.

Суммарное время закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал формируется на основе вычисления времени прохождения поездов по заданным участкам приближения и удаления в блоках «задержка».

В качестве среды для построения имитационной модели выбрана среда AnyLogic [74, 75, 76]. Для выходных данных автоматизирован сбор статистики и вычисление средних значений длительности закрытого состояния переезда для каждого направления, межпоездного интервала и моментов времени открытия и закрытия переезда (рис. 2.10).

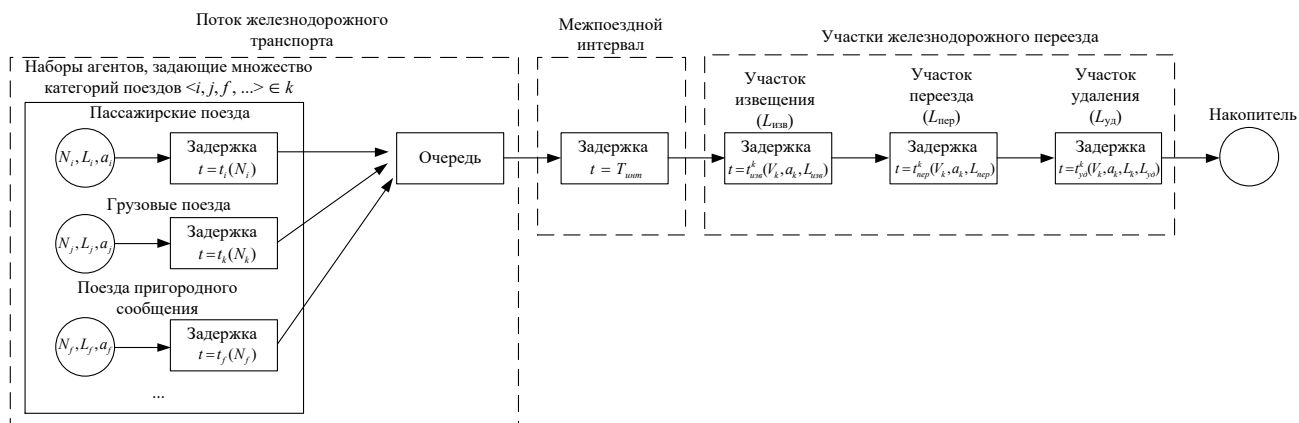


Рисунок 2.9 – Структура дискретно-событийной модели для определения длительности закрытого состояния железнодорожного переезда

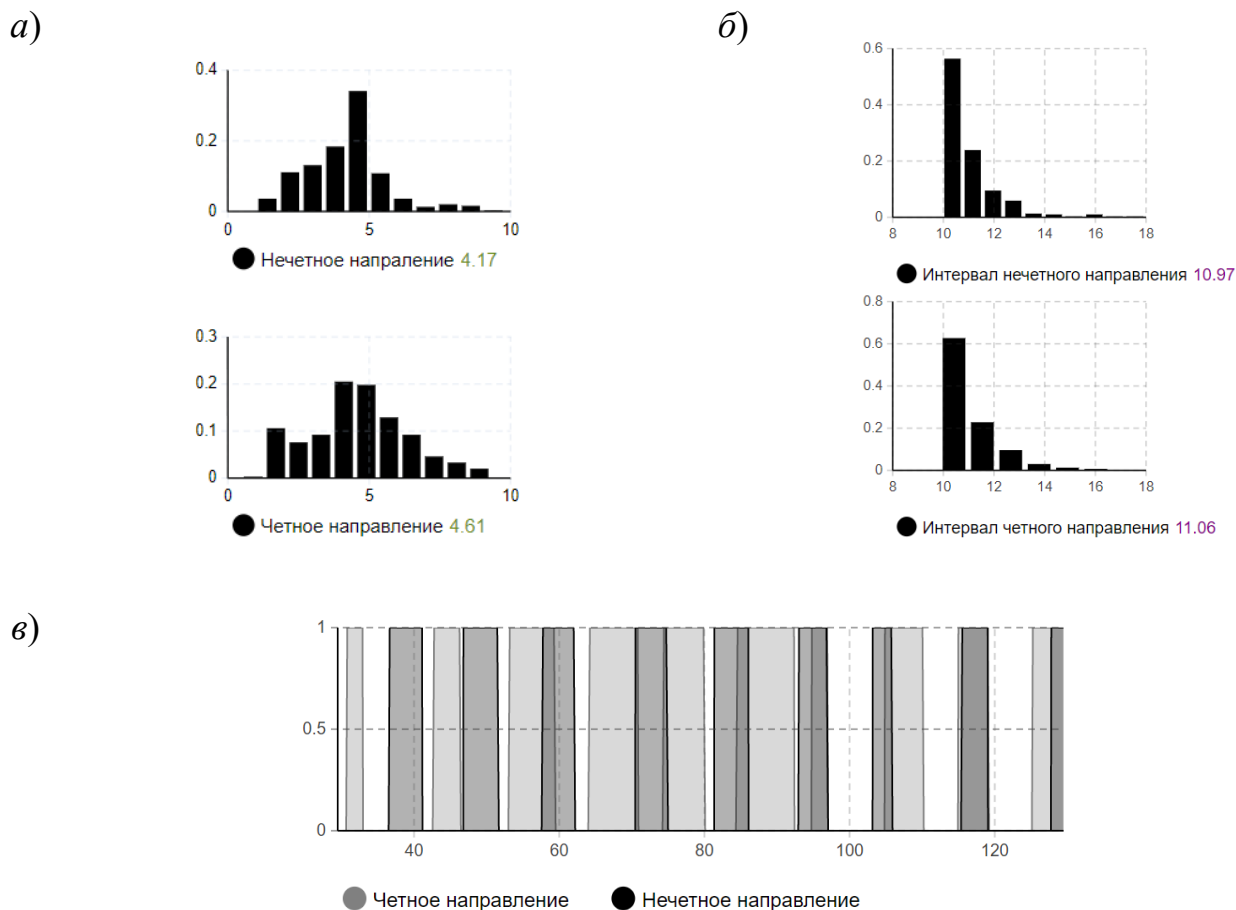


Рисунок 2.10 – Выходные данные имитационной модели, построенной в среде AnyLogic: а – распределение значений длительности закрытого состояния переезда для каждого направления движения; б – распределение значений интервала между поездами для каждого направления движения; в – моменты времени закрытия/открытия переезда

2.5 Метод оценки параметров работы переезда на основе статистических данных движения поездов

Задача оценки параметров работы переездной сигнализации может быть решена с использованием имитационного модели, учитывающей размеры движения поездов на участке, интенсивность и величину межпоездного интервала.

По результатам проведенного моделирования определяются:

- значение длины участка извещения переезда для каждого направления движения поездов;
- величина длительности закрытого состояния переезда при фактических параметрах работы переездной сигнализации;
- величина длительности закрытого состояния переезда при расчетной длине участка извещения к переезду.

В общем виде предлагаемый метод оценки параметров работы переезда содержит несколько этапов.

Этап сбора и подготовки данных исследуемого участка пути с переездом:

1. Определение типов подвижных составов по роду работы (пассажирский, грузовой, составы специального назначения), обращающихся на участке, для каждого направления движения;
2. Определение фактических размеров движения поездов по участку за заданный промежуток времени ($N_{\text{пасс}}$, $N_{\text{груз}}$, $N_{\text{спец}}$) для каждого направления движения;
3. Определение фактических длин поездов, обращающихся по участку, для каждого направления движения за заданный промежуток времени ($L_i^{\text{пасс}}$, $L_k^{\text{груз}}$, $L_m^{\text{спец}}$), м;
4. Определение фактических скоростей движений поездов на участках приближения для каждого направления движения к исследуемому переезду ($V_i^{\text{пасс}}$, $V_k^{\text{груз}}$, $V_m^{\text{спец}}$), м/с;

5. Определение длины переезда ($l_{пер}$), м.

Этап расчета параметров работы переездной сигнализации для различных категорий поездов на участке:

1. Определение расчетного времени извещения для каждого направления движения, ($t_{и}^p$), сек.;
2. Определение фактического времени извещения на переезд для каждого направления движения с учетом применяемых устройств заграждения и переездной сигнализации, ($t_{и}^ф$), сек.;
3. Определение фактической длины участка извещения к переезду для каждого направления движения ($L_{и}^ф$), сек.;
4. Определение фактического значения суммарного времени закрытого состояния переезда за заданный промежуток времени для каждого направления движения ($T_{закр}^ф$), сек.;
5. Расчет длины участка извещения на основе параметров движения поезда на исследуемом участке $L_{и}^p$. Расчет производится для каждого направления движения поезда с учетом расчетного времени подачи извещения на переезд $t_{и}^p$, согласно формуле:

$$L_{и}^p[n] = \frac{V[n] \cdot t_{и}^p}{3,6}, \quad (2.8)$$

где $V[n]$ – скорость движения n -го поезда на исследуемом участке пути, м/с.

При этом в качестве расчетного значения $L_{и}^p$ принимается максимальное полученное значение длины участка извещения: $\max[L_{и}^p[n]]$.

6. Расчет времени длительности закрытого состояния переезда за заданный промежуток времени для каждого направления движения поездов для *расчетных параметров* работы переездной сигнализации:
 - а. Определение ожидаемого значения времени длительности закрытого состояния переезда для указанных типов поездов каждого направления движения.

Длительность закрытого состояния переездной сигнализации для n -го поезда определяется по формуле:

$$t_{\text{закр}}^p[n] = \frac{L_{\text{и}}^p + l_{\text{пер}} + l_{\text{уу}} + L_n}{V[n]} + t_{\text{АПС}}, \quad (2.9)$$

где $L_{\text{и}}^p$ – максимальное полученное значение длины участка извещения, м;
 $l_{\text{уу}}$ – фактическая длина участка удаления, при освобождении которого извещение на переезд прекращается, м;
 L_n – длина n -го поезда, м;
 V_n – скорость движения n -го поезда на исследуемом участке пути, м/с;
 $t_{\text{АПС}}$ – время выключения автоматической переездной сигнализации (срабатывания приборов извещения и управления переездной сигнализацией) и открытия переезда для проезда автотранспорта, принимается равным 15 сек.

б. Определение выборочного среднего значения времени закрытого состояния переезда для каждого из типов подвижного состава, обращающихся на исследуемом участке:

$$\begin{cases} \bar{T}_{\text{закр}}^p[i] = \frac{1}{N_{\text{пасс}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{пасс}}} t_{\text{закр}}^p[i], \\ \bar{T}_{\text{закр}}^p[k] = \frac{1}{N_{\text{груз}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{груз}}} t_{\text{закр}}^p[k], \\ \bar{T}_{\text{закр}}^p[m] = \frac{1}{N_{\text{спец}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{спец}}} t_{\text{закр}}^p[m]. \end{cases} \quad (2.10)$$

в. Определение суммарного значения среднего времени закрытого состояния переезда взвешенного по количеству поездов ($T_{\text{закр}}^p$):

$$T_{\text{закр}}^p = \bar{T}_{\text{закр}}^p[n] \times N, \quad (2.11)$$

где $\bar{T}_{\text{закр}}^p[n] = \bar{T}_{\text{закр}}^p[i] + \bar{T}_{\text{закр}}^p[k] + \bar{T}_{\text{закр}}^p[m]$ – сумма средних значений времени закрытого состояния переезда, с;

N – количество поездов проходящих через переезд за исследуемый промежуток времени: $N = N_{\text{пасс}} + N_{\text{груз}} + N_{\text{спец}}$.

7. Расчет суммарного времени закрытого состояния переезда за заданный промежуток времени для одного направления движения поездов при фактических параметрах работы переездной сигнализации:

- а. Определение ожидаемого значения времени длительности закрытого состояния переезда для указанных типов поездов каждого направления движения.

При этом длительность закрытого состояния переездной сигнализации для n -го поезда определяется по формуле:

$$t_{\text{закр}}^{\text{м}}[n] = \frac{L_{\text{изв}}^{\phi} + l_{\text{пер}} + l_{\text{уу}} + L_n}{V[n]} + t_{\text{АПС}}, \quad (2.12)$$

где $L_{\text{изв}}^{\phi}$ – фактическое значение длины участка извещения, м.

- б. Определение выборочного среднего значения времени закрытого состояния переезда для каждого из типов подвижного состава, обращающихся на исследуемом участке:

$$\begin{cases} \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[i] = \frac{1}{N_{\text{пасс}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{пасс}}} t_{\text{закр}}^{\text{м}}[i], \\ \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[k] = \frac{1}{N_{\text{груз}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{груз}}} t_{\text{закр}}^{\text{м}}[k], \\ \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[m] = \frac{1}{N_{\text{спец}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{спец}}} t_{\text{закр}}^{\text{м}}[m]. \end{cases} \quad (2.13)$$

- в. Определение суммарного значения среднего времени закрытого состояния переезда, взвешенного по количеству поездов ($T_{\text{закр}}^{\text{м}}$):

$$T_{\text{закр}}^{\text{м}} = \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[n] \times N, \quad (2.14)$$

где $\bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[n] = \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[i] + \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[k] + \bar{T}_{\text{закр}}^{\text{м}}[m]$ – сумма средних значений времени закрытого состояния переезда, с.

Параметры работы переездной сигнализации, при которых обеспечивается оптимальное время закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал, выбираются согласно критерию (1.10):

1. Для проведения оценки существующих переездов, оборудованных устройствами автоматической переездной сигнализацией, применим следующий критерий:

$$H_c = M \{ (T_{\text{закр}}^{\phi} - T_{\text{закр}}^{\text{м}})^2 \} \rightarrow \min. \quad (2.15)$$

При этом сравниваются фактическое время закрытого состояния за исследуемый временной интервал существующего переезда ($T_{\text{закр}}^{\Phi}$) и значение, полученное на основе данных о длине, скорости и размерах движения поездов ($T_{\text{закр}}^{\text{М}}$). Если условие минимума математического ожидания квадрата разности соответствующих переменных выполняется, это указывает на то, что время подачи извещения приближения поезда к переезду формируется в соответствии с расчетными параметрами работы АПС.

2. Для вновь проектируемых переездов с применением устройств автоматической переездной сигнализации предлагается критерий:

$$H_n = M\{(T_{\text{закр}}^{\text{Р}} - T_{\text{закр}}^{\text{М}})^2\} \rightarrow \min. \quad (2.16)$$

Следовательно, математическое ожидание квадрата разности значений времени закрытого состояния переезда, вычисленных на основе данных о длине, скорости и размерах движения поездов, при расчетных параметрах работы АПС ($T_{\text{закр}}^{\text{Р}}$) и при фактических параметрах ($T_{\text{закр}}^{\text{М}}$) примет минимальную величину в случае соответствия фактических и расчетных условий подачи извещения на переезд.

Стоит отметить, что оценка функционирования железнодорожных переездов необходима в указанных случаях:

- повышение интенсивности движения автомобильного транспорта на участке пересечения автодороги с железнодорожными путями;
- повышение простоя автотранспорта и количества нарушений правил дорожного движения в границах пересечения с железнодорожными путями;
- изменение интенсивности движения поездов на железнодорожном участке;
- изменение допустимых параметров движения поездов на участке, в т.ч. пропуск скоростных поездов и организация тяжеловесного движения;
- изменение категории железнодорожного переезда;

- модернизация устройств переездной сигнализации, в т.ч. переоборудование и/или внедрение устройств заграждения, устройств контроля свободности зоны переезда и др;
- модернизация систем интервального регулирования движением поездов на перегоне и систем электрической централизации на станции, в т.ч. изменение длин блок-участков и путевых секций, совершенствование устройств контроля свободности участков пути.

2.6 Экспериментальная проверка достоверности результатов моделирования

С целью обоснования достоверности результатов исследования необходимо произвести сопоставление полученных в модели параметров функционирования устройств переездной сигнализации с реальными (фактическими) показателями работы переезда.

Условия и этапы проверки достоверности результатов следующие:

1. Временной период для анализа данных принят равным 12 часам (06:00 – 18:00), что соответствует продолжительности рабочей смены дежурного по станции;
2. Вычисление фактического суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал на основе данных архивных записей автоматизированного рабочего места (АРМ) дежурного по станции системы релейно-процессорной электрической централизации ЭЦ-МПК;
3. Анализ данных исполненного графика движения поездов ГИД-Урал на выбранном участке в четном и нечетном направлении движения поездов;
4. Расчет суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал с помощью предлагаемого метода;

5. Сравнение фактических значений и значений, полученных на основе моделирования.

Для получения фактических параметров функционирования переездной сигнализации выбран железнодорожный переезд с дежурным работником, расположенный на двухпутном перегоне Юг-Кукуштан участка Свердловской железной дороги. Переезд оборудован устройствами АПС и УЗП, условия работы исследуемого переезда представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Условия работы переезда

Параметры переезда	Значения
Длина переезда, м	22
Ширина переезда, м	7,3
Установленная скорость по участку (четное направление), км/ч	100
Установленная скорость по участку (нечетное направление), км/ч	100
Время подачи извещения (четное направление), с	45,1
Время подачи извещения (нечетное направление), с	45,1
Фактическая длина участка извещения (четное направление) $L^{\Phi}_{изв}$, м	1260
Фактическая длина участка извещения (нечетное направление) $L^{\Phi}_{изв}$, м	1260
Фактическая длина участка удаления (четное направление) $L^{\Phi}_{уд}$, м	249
Фактическая длина участка удаления (нечетное направление) $L^{\Phi}_{уд}$, м	351

Фактические значения длин участков приближения/удаления получены на основе данных проектной документации: положения элементов путевого развития вдоль исследуемой железнодорожной линии (ординат), обозначенных на путевом плане перегона (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчета фактических значений длин участков железнодорожного переезда

Направление движение	Объекты на путевом плане перегона	Ордината
Установленное четное направление движения	Светофор НД	ПК14751+31
	Начало участка подачи извещения на переезд	ПК14778+80
	Конец участка удаления за переездом	ПК14793+93
Установленное нечетное направление движения	Начало участка подачи извещения на переезд	ПК14804+08
	Светофор ЧД	ПК14865+20
	Конец участка удаления за переездом	ПК14787+93

Для построения предлагаемой модели, помимо условий работы переездной сигнализации, необходимы следующие данные:

- количество поездов на участке;

- скорости движения поездов на участке;
- длины поездов на участке.

На основе анализа данных исполненного графика движения поездов ГИД-Урал на исследуемом участке за заданный период времени определено количество подвижного состава, определены категории поездов, рассчитаны условные длины поездов.

На исследуемом участке перегона выделены следующие категории поездов:

- пассажирские поезда в международном, дальнем и местном сообщении;
- пригородные поезда;
- грузовые поезда, в т.ч. поезда повышенной массы и повышенной длины;
- резервные локомотивы без вагонов;
- автодрезины.

Размер движения поездов на участке представлен в приложении А в таблицах А.1 и А.2 для четного и нечетного направлений движения соответственно.

Данные о скорости движения поездов на участке приближения формируются на основании расчетов времени прохождения блок-участков перегона входящих в участок приближения к переезду. Гистограмма скоростей на участке за выбранный промежуток времени представлена на рисунке 2.11.

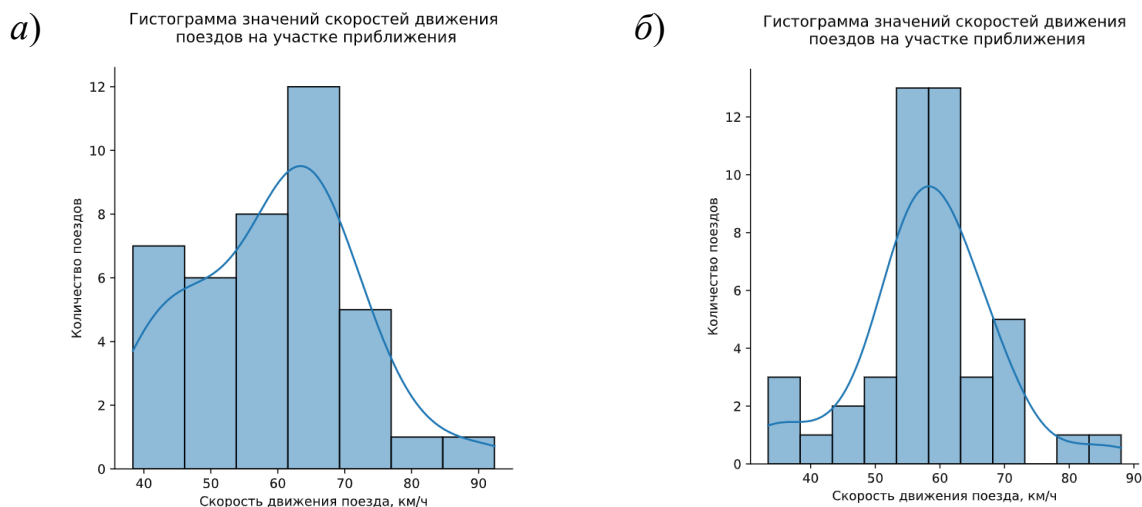


Рисунок 2.11 – Гистограмма значений скоростей поездов на участке приближения к переезду: а – четное движение поездов; б – нечетное движение поездов

Подсчет фактического времени закрытого состояния переезда за исследуемый промежуток времени основывался на изменении дискретной информации о состоянии контролируемого объекта (объекта телесигнализации) на основе архивных записей АРМ дежурного по станции системы релейно-процессорной электрической централизации ЭЦ-МПК. Контроль закрытого/открытого состояния переездной сигнализации устройствами релейно-процессорной централизации ЭЦ-МПК осуществляется по состоянию реле. Фрагмент архивных записей приведен на рисунке 2.12.

	Время (<->)	Место	Объект	Источник	Значение	Свойство
571	19:20:04 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Открыт	состояние
618	19:21:18 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Закрыт	состояние
620	19:21:18 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Идет	Извещение
1805	19:33:24 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Открыт	состояние
2934	19:57:41 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Закрыт	состояние
2936	19:57:41 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Идет	Извещение
3662	20:05:52 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Открыт	состояние
4248	20:13:28 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Закрыт	состояние
4250	20:13:28 12.07.21	Юг	Переезд 1480км	ТС	Идет	Извещение

Рисунок 2.12 – Фрагмент архива событий автоматизированного рабочего места механика системы ЭЦ-МПК

Статистический анализ фактических данных приведен ниже и включает в себя построение интервального ряда и интервальную оценку выборки.

Группировка данных и расчет интервального ряда представлены в таблице 2.3. При этом число групп k определяется согласно формуле Стэрджесса:

$$k = 1 + 3,322 \log(n) = 1 + 3,322 \log(121) = 8, \quad (2.17)$$

где n – объем выборки.

Длина интервалов вычисляется по формуле:

$$h = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{k} = 77, \quad (2.18)$$

где x_{\max} – максимальное значение выборки;

x_{\min} – минимальное значение выборки.

Таблица 2.3 – Построение интервального ряда данных длительности закрытого состояния переезда

Интервал x_k	Середина интервала	Число элементов выборки попавших в k -ый интервал	Величина плотности частот	Величина плотности относительных частот
127 - 204	165,5	16	0,132	0,0017
204 - 281	242,5	54	0,446	0,0058
281 - 358	319,5	34	0,281	0,0036
358 - 435	396,5	8	0,066	0,0009
435 - 512	473,5	4	0,033	0,0004
512 - 589	550,5	3	0,025	0,0003
589 - 666	627,5	1	0,008	0,0001
666 - 743	704,5	1	0,008	0,0001

Оценка основных статистических параметров для исследуемых фактических значений выборки длительности закрытого состояния переезда: среднее выборочное равно $\mu = 283,86$, среднеквадратическое отклонение составляет $\sigma = 92,36$. На рисунке 2.13 представлена гистограмма частот по каждому интервалу исследуемой выборки.

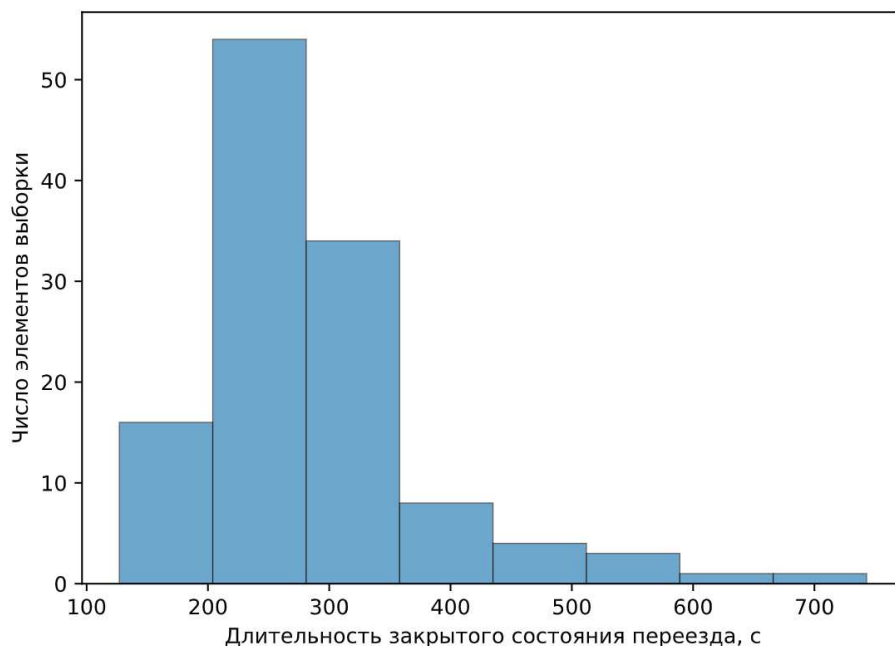


Рисунок 2.13 – Гистограмма частот интервалов выборки фактических значений длительности закрытого состояния переезда

Доверительный интервал для средних выборочных исследуемого значения определяется на основе известной формулы:

$$\left(\mu - z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \mu + z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right). \quad (2.19)$$

Для доверительного интервала при уровне значимости $\alpha = 0,05$ квантиль $Z_{1-\alpha/2}$ имеет значение равное 2,32. Тогда, согласно формуле (2.19), искомый доверительный интервал для среднего значений имеет следующие границы:

$$\left(283,86 - 2,32 \times \frac{92,36}{\sqrt{121}}; 283,86 + 2,32 \times \frac{92,36}{\sqrt{121}}\right) = (264,38; 303,34), \text{ сек.}$$

Таким образом, с вероятностью 0,95 среднее значение длительности закрытого состояния переезда при $n \rightarrow \infty$ не выйдет за пределы интервала (264,38; 303,34) сек.

2.6.1 Расчет и оценка длительности закрытого состояния переезда

Результаты расчета длительности закрытого состояния переезда при следовании через переезд каждого поезда с заданными индивидуальными параметрами движения на основе имитационного моделирования представлены графически в виде нормализованных в интервале $[0; 1]$ гистограмм (рис. 2.14).

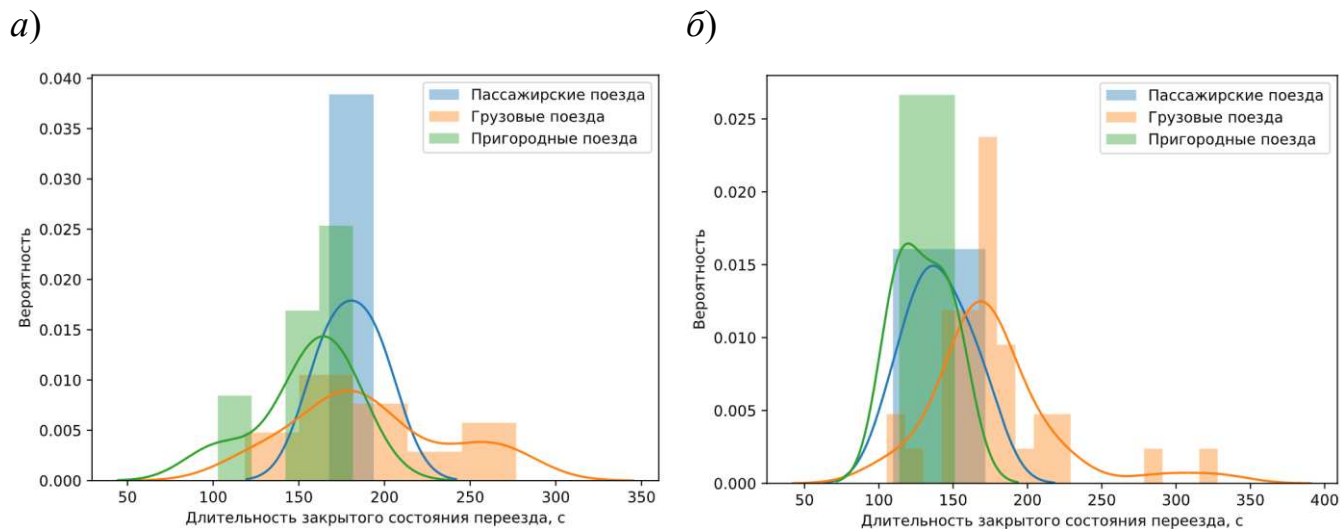


Рисунок 2.14 – Гистограммы и оценка плотности распределения длительности закрытого состояния переезда при проезде одного поезда в зоне переезда: *а* – для четного пути следования поездов; *б* – для нечетного пути следования поездов

На основе оценки плотности (*kde*) определены статистические показатели полученных значений для каждой категории поездов (табл. 2.4): максимальное значение и ожидаемое значение (среднее данных).

Таблица 2.4 – Статистические показатели полученных значений суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал для каждой категории поездов и установленного направления движения на исследуемом перегоне

Категории поездов	Пассажирские поезда		Грузовые поезда		Пригородные поезда	
	Чет.	Нечет.	Чет.	Нечет.	Чет.	Нечет.
Ожидаемое значение времени длительности закрытого состояния переезда, сек	164,87	140,09	179,91	176,86	138,7	129,86
Максимальное значение времени длительности закрытого состояния переезда, сек	176,55	171,71	258,53	328,02	163,27	151,2

Смоделированные значения длительности закрытого состояния переезда для исследуемого участка представлены в виде гистограммы на рисунке 2.15.

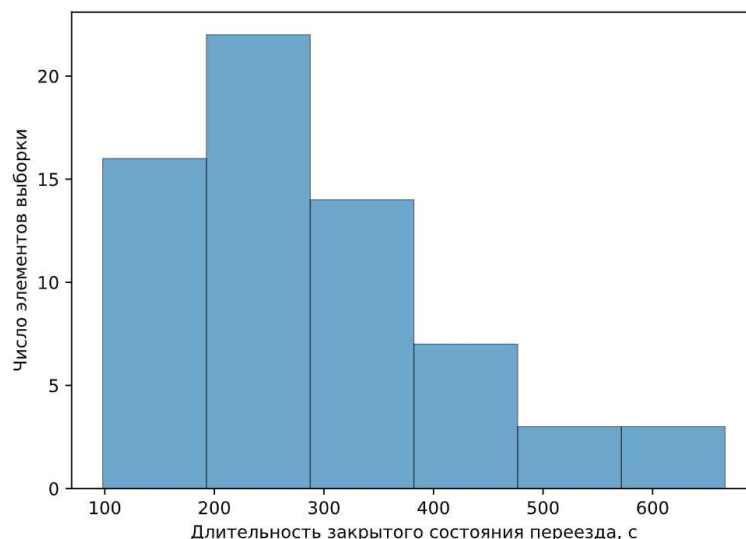


Рисунок 2.15 – Гистограмма выборки значений длительности закрытого состояния переезда, рассчитанных с помощью построенной модели

Среднее значение выборки принадлежит доверительному интервалу для средних фактических значений длительности закрытого состояния переезда и составляет $\bar{X} = 284,25$ сек.

Для проверки адекватности результатов расчетов имитационной модели рассмотрена гипотеза H_0 о принадлежности выборке смоделированных данных X_1 совокупности фактических данных X_2 ($H_0: F(X_1) = F(X_2)$) на основе статистического U -критерия Манна-Уитни-Уилкоксона. Альтернативная гипотеза $H_1: F(X_1) \neq F(X_2)$.

Выражения для определения показателя статистики U -критерия [77]:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= R_1 - \frac{n_1(n_1+1)}{2}; \\
 U_2 &= R_2 - \frac{n_2(n_2+1)}{2}; \\
 U &= \min\{U_1; U_2\},
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

где U_1 – статистики U -критерия для выборки X_1 объемом n_1 ;

U_2 – статистики U -критерия для выборки X_2 объемом n_2 ;

R_1 – сумма рангов выборки X_1 ;

R_2 – сумма рангов выборки X_2 .

Для исследуемых выборок, согласно выражениям (2.20), получены следующие значения: $R_1 = 5963$, $R_2 = 11428$, $U_1 = 4047$, $U_2 = 3818$, $U = \min(4047; 3818) = 3818$.

При $n \rightarrow \infty$ и справедливости нулевой гипотезы U -распределение соответствует нормальному распределению, а стандартизированная оценка рассчитывается согласно формуле [78]:

$$z = \frac{U - m_U}{\sigma_U}. \quad (2.21)$$

Среднее и среднеквадратическое отклонение U -распределения равно $m_U = \frac{n_1 n_2}{2} = 3932,5$ и $\sigma_U = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} = 350,09$ соответственно.

Вычисленное среднее значение составляет $z = -0,32$ стандартных единиц ошибки от среднего значения U -распределения. Поскольку z значение не выходит за область критических значений при уровне значимости 0,05 (-1,96; 1,96), то нет основания отвергнуть нулевую гипотезу.

Таким образом, полученный расчет оценки критерия не противоречит предположению о принадлежности одной генеральной совокупности фактических значений длительности закрытого состояния переезда и данных, полученных с помощью имитационного моделирования.

Сравнение фактического значения суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал с расчетным (табл. 2.5), указывает на то, что полученные значения сопоставимы.

Таблица 2.5 – Сравнение фактического и расчетного суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый промежуток времени

	Четное движение	Нечетное движение	Общий расчет
Фактическое значение, ч	2,78	3,1	5,48
Результаты расчета, ч	2,8	3,3	5,59

Фактическое суммарное время закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал составило с учетом движения только четных

поездов $T_{\text{закр}}^{\text{ф(четн)}} = 186,5$ минут, при движении только нечетных поездов $T_{\text{закр}}^{\text{ф(нечетн)}} = 166,9$ минут. Суммарное время закрытого состояния переезда с учетом четного и нечетного направления движения поездов на перегоне составляет 328,8 минут или 5,48 часов за исследуемый промежуток времени (12 часов).

Полученный результат показывает, что за исследуемый временной интервал 42% времени переезд находится в закрытом состоянии.

Таким образом, предлагаемый метод расчета позволяет оценить фактические параметры и условия работы переездной сигнализации с точки зрения длительности закрытого состояния переезда.

2.6.2 Расчет и оценка длины участка извещения к переезду

При расчете индивидуальных длин участков извещения для каждого переезда в качестве исходных данных используется распределение фактических значений скоростей поездов на участке приближения к переезду.

В результате проведенных расчетов получены данные значений длин участков извещения, удовлетворяющие условию формирования оповещения о приближении поезда на основе фактической скорости движения поезда. Линейно нормализованные в интервале $[0; 1]$ найденные значения представлены в виде графика распределения плотности вероятности (рис. 2.16) для четного и нечетного направлений движения поездов.

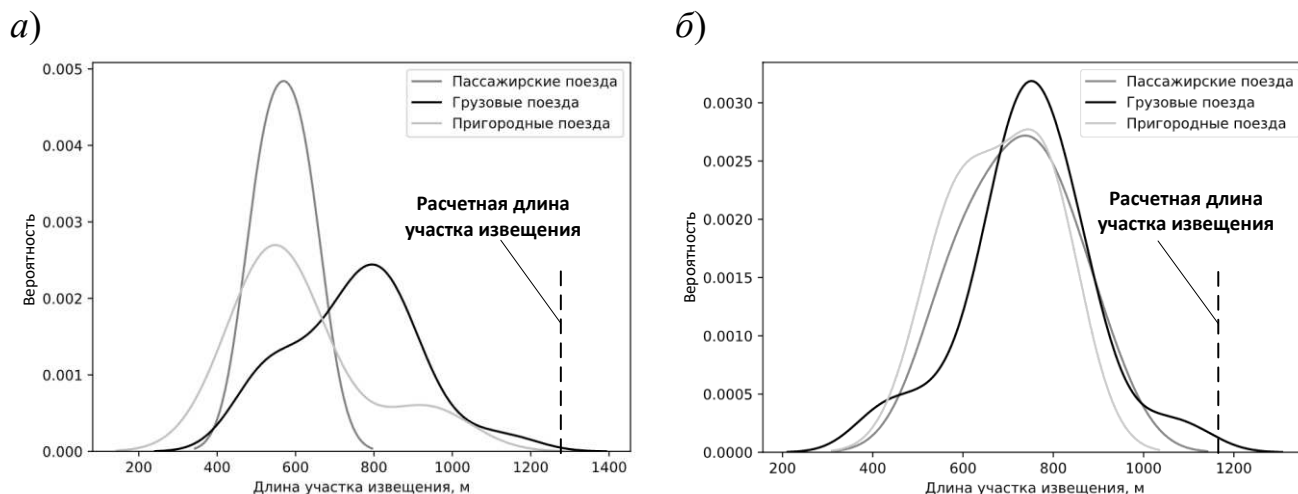


Рисунок 2.16 – График распределения плотности вероятности значений длин участков приближения к переезду: *a* – четное движение поездов; *б* – нечетное движение поездов

Из полученных данных следует, что фактические параметры работы АПС отличны от расчетных.

На основе оценки плотности (*kde*) определены статистические показатели значений длин участков извещения для каждой категории поездов (табл. 2.6): максимальное значение и ожидаемое значение, характеризующее среднее полученных данных.

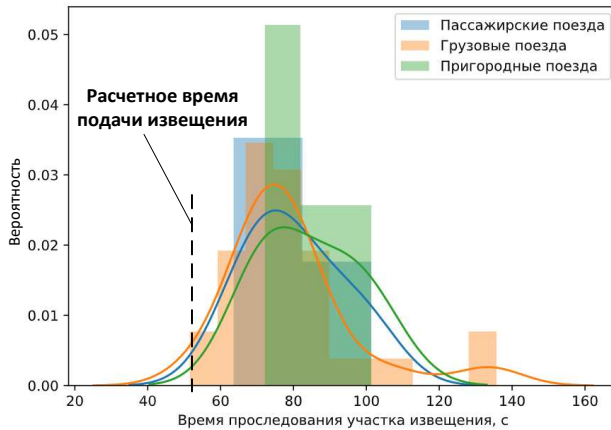
Таблица 2.6 – Статистические показатели полученных значений длин участков извещения к переезду

Категории поездов	Пассажирские поезда		Грузовые поезда		Пригородные поезда	
	Чет.	Нечет.	Чет.	Нечет.	Чет.	Нечет.
Ожидаемое значение длины участка извещения, м	569,37	722,67	748,97	744,83	685,42	613,02
Максимальное значение длины участка извещения, м	617,5	892,09	1154,61	1100,2	933,51	785,89

Таким образом, выявлено, что 99 % полученных значений длин участка извещения к переезду, достаточных по условию обеспечения минимального времени подачи извещения, не превышают значения $\hat{L}_{\text{прибл}} = 1100$ м., а максимальное значение составляет $\hat{L}_{\text{прибл}}^{\text{max}} = 1154$ м.

Полученные данные значений времени проследования поездов участка извещения к переезду представлены на рисунке 2.17 в виде гистограмм и кривых распределения плотности вероятности.

а)



б)

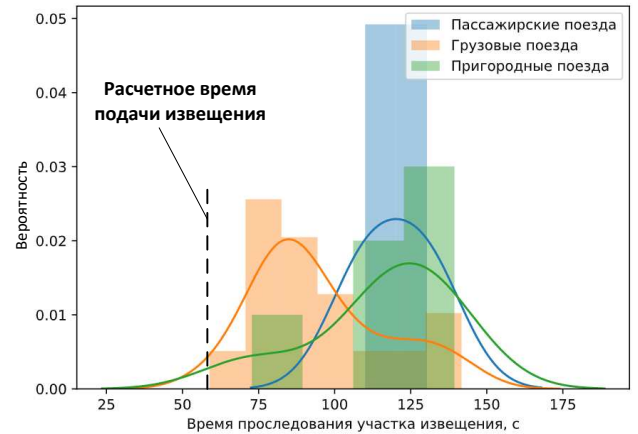


Рисунок 2.17 – Гистограммы значений времени проследования поездов участка извещения к переезду: *а* – четное движение поездов; *б* – нечетное движение поездов

Из представленных графиков определено, что время следования поезда по участку извещения больше расчетного времени подачи извещения, что, в свою очередь, приводит к повышенной длительности закрытого состояния переезда.

Обобщенное числовое распределение значений времени следования поездов по участку извещения в виде гистограммы представлено на рисунке 2.18.

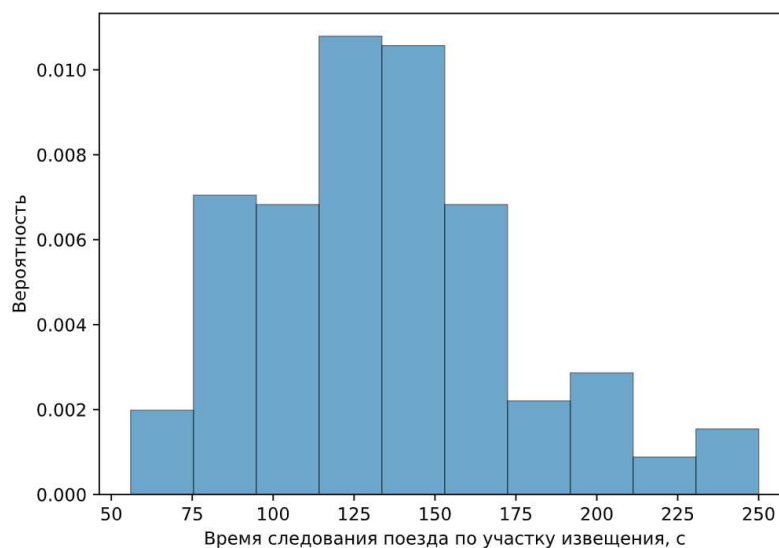


Рисунок 2.18 – Гистограмма распределения значений времени следования поездов по участку извещения

Анализ распределения значений, полученных в результате моделирования, и оценка различий с теоретическим законом распределения позволят обосновать возможность аппроксимации эмпирической функции распределения времени следования поездов по участку извещения.

Поскольку распределение дискретно целесообразно воспользоваться критерием хи-квадрат χ^2 . При этом выдвигается гипотеза H_0 , что исследуемая выборка значений времени следования поездов по участку извещения принадлежит логнормальному распределению: $X \sim \text{Log}N(\mu, \sigma^2)$:

$$H_0 : f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2}, \quad (2.22)$$

где σ – математическое ожидание натурального логарифма значений x ;

μ – стандартное отклонение натурального логарифма значений x .

Конкурирующая гипотеза H_1 заключается в том, что полученные данные не распределены по логнормальному закону.

Число интервалов и граничные точки интервалов группирования, а также расчет теоретической вероятности попадания значений в выбранный интервал и вычисление статистики критерия представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Расчет статистики критерия согласия для значений времени проследования поездов участка извещения перед переездом

Интервал x_k	Середина интервала	Число элементов выборки попавших в k -ый интервал	Плотность по результатам моделирования	Теоретическая вероятность попадания в k -ый интервал	Число наблюдений попавших в k -ый интервал	Значение статистики критерия χ^2_n
52,1 - 71,3	61,7	4	0,0009	0,00093	4,16	0,0063
71,3 - 90,5	80,9	27	0,0060	0,00468	21,03	1,69
90,5 - 109,7	100,1	33	0,0073	0,00924	41,5	1,74
109,7 - 128,9	119,3	49	0,0109	0,01092	49,06	0,000083
128,9 - 148,1	138,5	48	0,0107	0,00952	42,79	0,63
148,1 - 167,3	157,7	34	0,0076	0,00686	30,83	0,32
167,3 - 186,5	176,9	11	0,0024	0,00437	19,62	3,79
186,5 - 205,7	196,1	12	0,0027	0,00256	11,5	0,022
205,7 - 224,9	215,3	8	0,0018	0,00142	6,37	0,41
224,9 - 244,1	234,5	6	0,0013	0,00076	3,4	1,98
244,1 - 263,3	253,7	2	0,0004	0,00039	1,77	0,029

На рисунке 2.19 представлено сопоставление гистограммы исследуемой выборки времени следования поездов по участку извещения с графиком распределения плотности вероятности логнормального распределения.

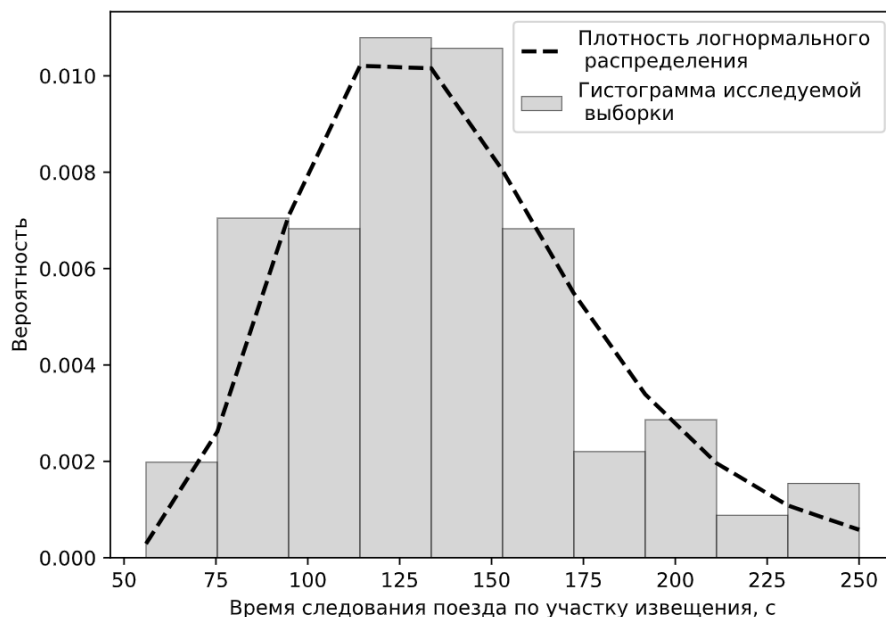


Рисунок 2.19 – График плотности логнормального распределения совмещенный с гистограммой исследуемой выборки

Основные статистические параметры для натурального логарифма значений из исследуемой выборки: среднее выборочное логарифма значений равно $\bar{X} = 4,86$, стандартное отклонение составляет $S = 0,29$.

Наблюдаемое значение статистики χ^2_n составляет $K_{\text{набл}} = 10,63$.

Критическое значение $K_{\text{крит}} = 15,5$ при величине степени свободы равной $r = k - m - 1 = 11 - 2 - 1 = 8$, где m – количество оценённых по выборке параметров (выборочное среднее и выборочное стандартное отклонение).

Согласно проведенной статистической оценке по критерию согласия Пирсона, на уровне значимости 0,05 наблюдаемое значение статистики критерия не попадает в критическую область $[K_{\text{крит}}; +\infty)$: $K_{\text{набл}} < K_{\text{крит}}$, таким образом нет основания отвергать нулевую гипотезу H_0 . Следовательно, можно утверждать, что величина времени следования поезда по участку извещения распределена по логнормальному закону.

Оценка распределения выборочных средних $X = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)$ получена с помощью моделирования методом Монте-Карло при заданном количестве

прогонов построенной модели $n = 1000$. Гистограмма значений выборочных средних представлена на рисунке 2.20, среднее значение совокупности равно $M[X] = 130,53$, среднеквадратичное отклонение составляет $\sigma = 4,38$.

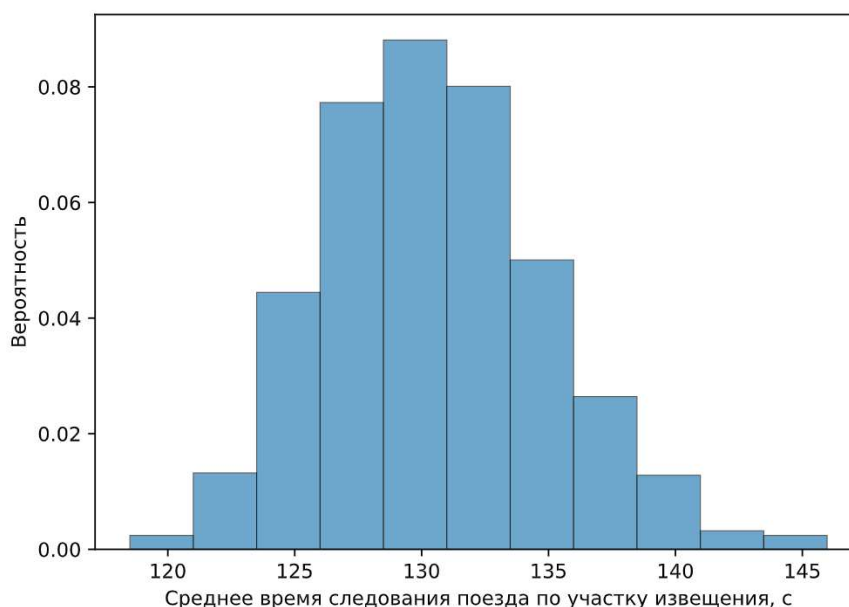


Рисунок 2.20 – Гистограмма распределения значений выборочных средних времени следования поездов по участку извещения

С целью проверки по критерию хи-квадрат соответствия распределения величин нормальному закону установлена нулевая гипотеза H_0 : исследуемая выборка значений выборочных средних времени следования поездов по участку извещения распределена согласно нормальному распределению: $X \sim N(\mu, \sigma^2)$:

$$H_0 : f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad (2.23)$$

где σ – математическое ожидание распределения;

μ – стандартное отклонение распределения.

С другой стороны, альтернативная гипотеза H_1 заключается в том, что распределение исследуемых данных не подчиняется нормальному закону распределения.

Расчет теоретической вероятности попадания значений в интервалы и вычисление статистики критерия представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Расчет статистики критерия согласия для значений средних выборочных времени проследования поездов участка извещения перед переездом

Интервал x_k	Середина интервала	Число элементов выборки попавших в k -ый интервал	Плотность по результатам моделирования	Теоретическая вероятность попадания в k -ый интервал	Число наблюдений попавших в k -ый интервал	Значение статистики критерия χ^2_n
118,507 - 121,004	119,7555	6	0,002	0,004	11,071	2,323
121,004 - 123,501	122,2525	33	0,013	0,015	38,159	0,698
123,501 - 125,998	124,7495	111	0,044	0,038	95,115	2,653
125,998 - 128,495	127,2465	192	0,077	0,069	171,443	2,465
128,495 - 130,992	129,7435	221	0,088	0,089	223,468	0,027
130,992 - 133,489	132,2405	200	0,080	0,084	210,637	0,537
133,489 - 135,986	134,7375	125	0,050	0,057	143,574	2,403
135,986 - 138,483	137,2345	66	0,026	0,028	70,769	0,321
138,483 - 140,98	139,7315	32	0,013	0,010	25,225	1,820
140,98 - 143,477	142,2285	8	0,003	0,003	6,502	0,345
143,477 - 145,976	144,7265	2	0,002	0,000	1,211	0,514

На основе проведенных расчетов наблюдаемое значение статистики χ^2 составляет $K_{\text{набл}} = 14,1$.

Критическое значение $K_{\text{крит}} = 15,5$ при степени свободы равной $r = k - m - 1 = 11 - 2 - 1 = 8$, где m — количество оценённых по выборке параметров (среднее значение совокупности и среднеквадратичное отклонение).

Согласно проведенной статистической оценке по критерию согласия Пирсона, на уровне значимости 0,05 наблюдаемое значение статистики критерия не попадает в критическую область $[K_{\text{крит}}; +\infty)$: $K_{\text{набл}} < K_{\text{крит}}$, таким образом, нет основания отвергать нулевую гипотезу H_0 . На рисунке 2.21 представлено сравнение гистограммы исследуемой выборки с плотностью вероятности нормального распределения.

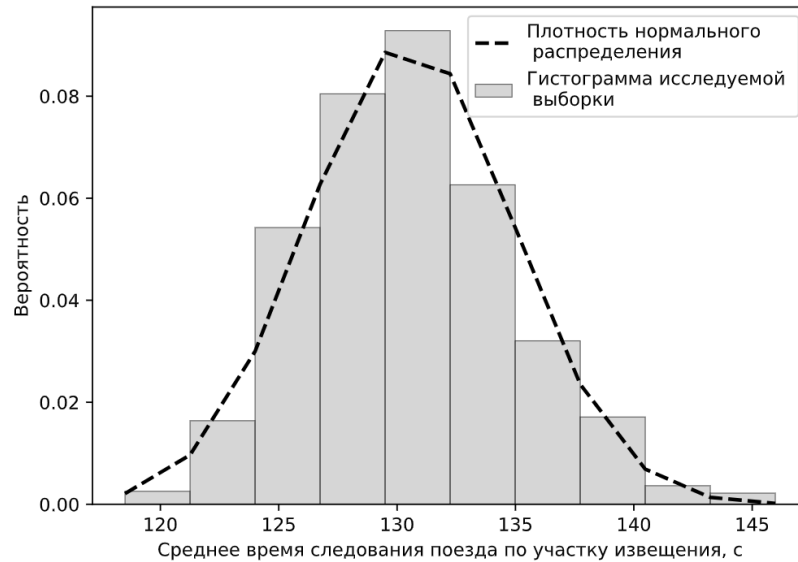


Рисунок 2.21 – График плотности нормального распределения совмещенный с гистограммой исследуемой выборки

В результате статистических оценок установлено, что значения времени следования поездов по участку извещения, полученные по результатам моделирования, соотносятся со случайными величинами, распределенными по логарифмически-нормальному закону, а выборка средних значений времени следования поездов по участку извещения соответствует нормальному распределению.

Исследование параметров работы переездной сигнализации выполнено в рамках проектных и изыскательских работ ООО «КСА» для оценки эффективности функционирования железнодорожного переезда с дежурным работником, расположенным на двухпутном перегоне Юг-Кукуштан участка Свердловской железной дороги, и подтверждается соответствующей справкой об использовании результатов диссертационной работы (см. приложение Е). Полученные выводы позволили обосновать применение конкретных технических решений устройств ограждения и переездной сигнализации на переезде.

2.7 Исследование влияния сокращения межпоездного интервала на величину времени закрытого состояния переезда

С помощью разработанной имитационной модели проведено исследование влияния сокращения межпоездного интервала на целевой показатель функционирования железнодорожного переезда. В качестве независимой переменной принята величина межпоездного интервала I_i . При проведении расчетов допущено равенство величин межпоездного интервала для каждого направления движения поездов двухпутного участка перегона $I_i^{\text{чет}} = I_i^{\text{нечет}}$.

Количество прогонов принято равной 1000, модельное время задано равной 43200 с. Таким образом смоделировано функционирование железнодорожного переезда при заданных условиях движения поездов на двухпутном участке перегона за промежуток времени равный 12-ти часам реального времени.

В качестве искомым величин выбраны показатели, характеризующие среднюю долю времени закрытого состояния переезда по отношению к модельному времени $\bar{\tau}_{\text{закр}}$ (2.24) и среднюю величину суммарного времени закрытого состояния переезда $\bar{T}_{\text{закр}}$ за исследуемый временной интервал (2.25):

$$\bar{\tau}_{\text{закр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_i^{\text{закр}}}{t_i^{\text{модель}}}, \quad (2.24)$$

$$\bar{T}_{\text{закр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^{\text{закр}}, \quad (2.25)$$

где n – заданное количество прогонов модели для эксперимента Монте-Карло;

$T_i^{\text{закр}}$ – суммарное время закрытого состояния переезда в течении исследуемого модельного времени за i -ый прогон модели, сек;

$t_i^{\text{модель}}$ – модельное время за i -ый прогон модели, сек.

Полученные результаты прогонов модели, сведены в таблицу 2.9.

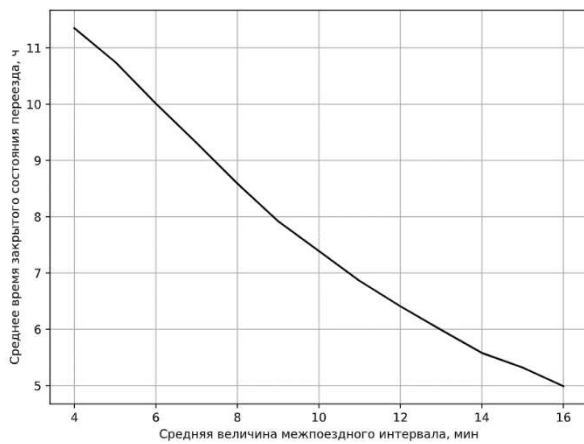
Таблица 2.9 – Результаты расчета среднего значения суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал, в зависимости от величины межпоездного интервала

Величина межпоездного интервала, мин.	Среднее суммарное время закрытого состояния переезда, час.	Средняя доля времени закрытого состояния переезда по отношению к модельному времени, %.
17	4,99	41,6
16	5,32	44,3
15	5,52	46,5
14	5,99	49,9
13	6,41	53,4
12	6,86	57,2
11	7,39	61,6
10	7,92	66,0
9	8,59	71,6
8	9,31	77,6
7	10,0	83,4
6	10,75	89,6
5	11,35	94,6
4	11,72	97,7
3	11,91	99,2
2,5	11,97	99,7

Зависимость среднего значения суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал от величины межпоездного интервала $\bar{T}_{\text{закр}} = f(I)$ представлена на рисунке 2.22, а. Зависимость средней доли времени закрытого состояния переезда по отношению к модельному времени от величины межпоездного интервала $\bar{\tau}_{\text{закр}} = f(I)$ представлена на рисунке 2.22, б.

Характер изменения кривых свидетельствует о том, что сокращение межпоездного интервала приводит к увеличению суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал. Полученные данные могут быть аппроксимированы линейной функцией.

а)



б)

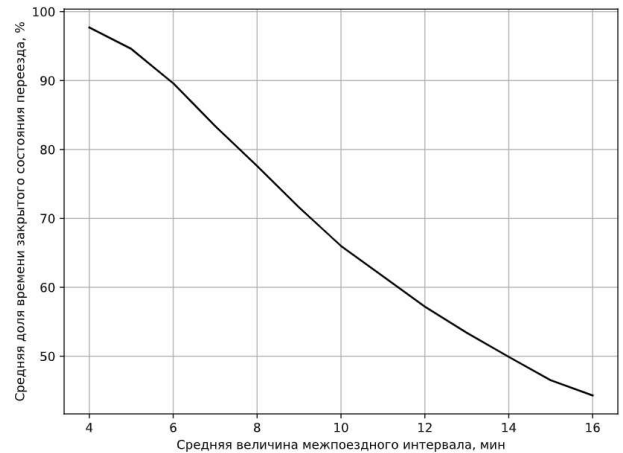


Рисунок 2.22 – Зависимость суммарного времени закрытого состояния переезда от величины межпоездного интервала: а – в единице измерения времени; б – в процентном соотношении к модельному времени

Результаты расчета средней длительности закрытого состояния переезда при следовании одного поезда по участкам зоны переезда представлены в таблице 2.10. Изменение межпоездного интервала не оказывает существенного влияния на длительность закрытого состояния переезда (рис. 2.23), поскольку в модели не изменялись характеристики подвижных составов и параметры движения поездов.

Таблица 2.10 – Результаты расчета средней длительности закрытого состояния переезда, в зависимости от величины межпоездного интервала

Величина межпоездного интервала, мин.	Средняя длительность закрытого состояния переезда, мин.
17	5,21
16	5,27
15	5,21
14	5,33
13	5,39
12	5,46
11	5,52
10	5,49
9	5,43
8	5,32
7	5,10
6	4,93
5	5,40
4	7,18

Графически зависимость представлена на рисунке 2.23.

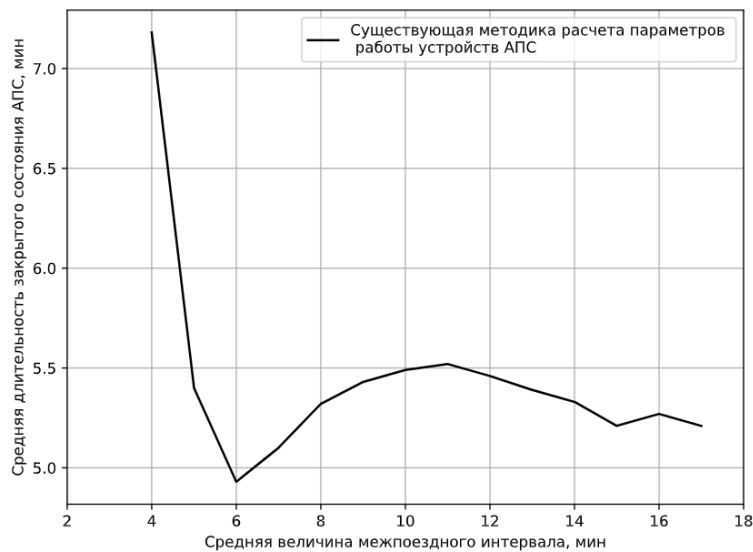


Рисунок 2.23 – Зависимость длительности закрытого состояния переезда от величины межпоездного интервала

Однако в области значений величины межпоездного интервала меньше пяти минут наблюдается резкое повышение длительности закрытого состояния переезда, это связано с тем, что занятие участка извещения к переезду наступает в тот момент, когда впередиидущий подвижной состав еще не покинул участок удаления. Переезд будет 95 % времени закрыт для проезда автотранспортных средств.

В итоге выявлено, что сокращение межпоездного интервала влияет как на продолжительность времени закрытого состояния переезда, так и на долю времени открытого состояния за определенный промежуток времени.

Выполненные расчеты показывают, что величина межпоездного интервала является значимым фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность функционирования железнодорожного переезда на перегоне. Изменение интенсивности движения поездов на участке влечет за собой увеличение простоя автотранспорта на переезде. Сокращение величины межпоездного интервала на 5 минут для исследуемого участка перегона может привести к тому, что при текущих параметрах работы железнодорожного переезда около 60 % времени переезд будет находиться в закрытом состоянии.

2.8 Исследование влияния различных методов управления АПС на величину времени закрытого состояния переезда

В качестве исследуемого показателя в разделе анализируется пропускная способность железнодорожной линии. Пропускная способность перегона характеризуется размерами движения поездов, которые могут быть реализованы в зависимости от технического оснащения перегона. При построении модели для проведения исследования допускается, что существующие СИРДП позволяют реализовать минимально возможную величину межпоездного интервала на исследуемом перегоне. В качестве промежутка времени в течение которого проводится имитационное моделирование принимается равным 12 часам.

На основании предлагаемых в работе методов расчета представляется возможным оценить, как изменится величина времени закрытого состояния железнодорожного переезда, при различных технических решениях управления устройствами АПС. В работе рассматриваются следующие подходы к управлению устройствами переездной автоматики:

1. Согласно существующим нормам и требованиям к проектированию и построению железнодорожного переезда, при котором участки извещения организованы с помощью путевых устройств наложения (рельсовые цепи, индуктивные датчика колеса) с фиксированной длиной контролируемых путевых секций. Параметры работы переездной автоматики рассчитаны исходя из установленной максимальной скорости движения поездов по железнодорожным путям.

2. Параметры работы переезда, основанные на фактических значениях параметров движения поездов на участке приближения (местоположение, скорость, ускорение, длина). Контроль проследования подвижного состава и его параметров движения производится на всех участках в зоне пересечения с автодорогой, в том числе и на участке удаления железнодорожного переезда.

В таблице 2.11 приведены результаты расчетов времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал при различных условиях расчета параметров работы АПС.

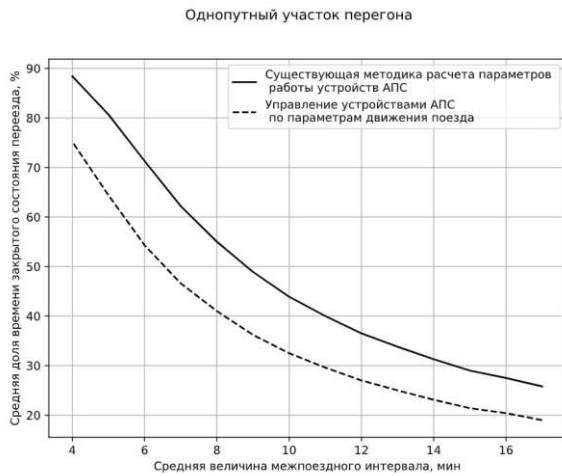
Таблица 2.11 – Сравнение суммарного времени закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал

Условия расчета параметров работы АПС	Среднее суммарное время закрытого состояния переезда за исследуемый временной интервал, ч
Параметры работы переезда, рассчитанные исходя из максимальной установленной скорости движения поезда на участке. Участок извещения и удаления переезда организованы с помощью путевых устройств наложения (рельсовые цепи, индуктивные датчика колеса) с фиксированной длиной контролируемых путевых секций.	5,59
«Плавающий» участок извещения к переезду, расчет длины которого основан на измерении фактического значения скорости движения поезда на участке приближения. Контроль проследования поезда и измерение параметров движения осуществляется на участках приближения и удаления переезда. Команда на открытие переезда формируется по проследованию хвоста поезда зоны пересечения с автодорогой.	3,8

В соответствии с полученными результатами расчета выявлено, что при управлении АПС на основе информации о параметрах движения поезда достигается сокращению суммарного времени закрытого состояния переезда на 30 % (с 5,59 часа до 3,8 часа за исследуемый 12-часовой промежуток времени).

Сокращение суммарного времени закрытого состояния переезда наблюдается как на однопутных, так и на двухпутных участках перегона (рис. 2.24).

а)



б)

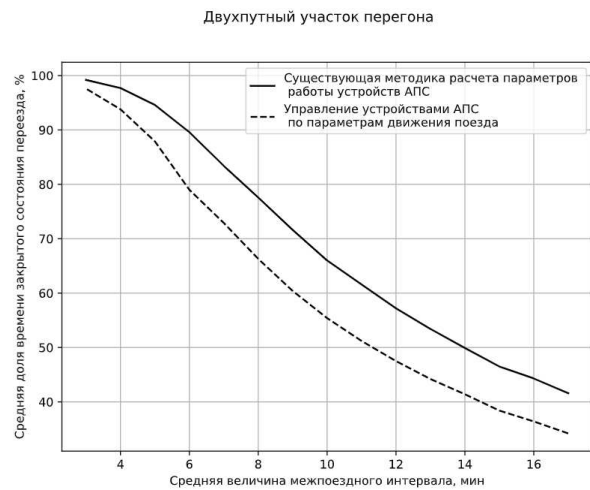
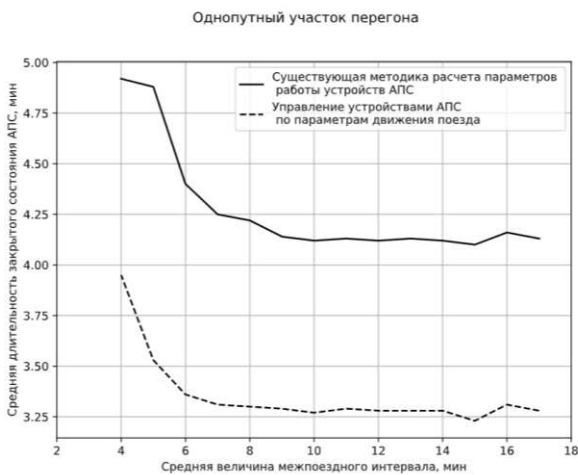


Рисунок 2.24 – Зависимости времени закрытого состояния переезда от величины межпоездного интервала при различных методах управления АПС: *а* – для однопутного участка перегона; *б* – для двухпутного участка перегона

Средняя длительность закрытого состояния переезда при следовании поездов через переезд сокращается на 23 % (рис. 2.25).

а)



б)

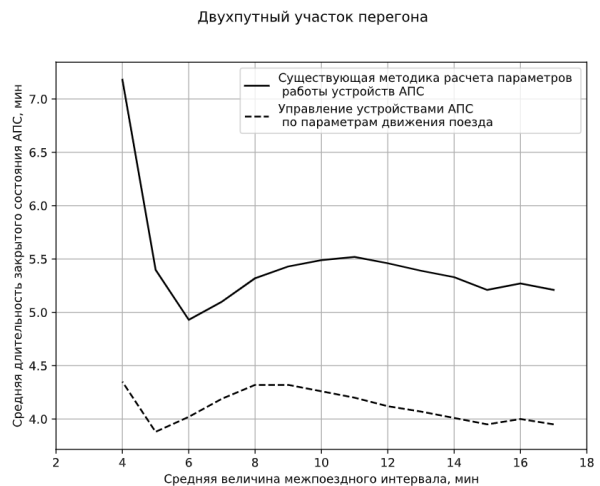


Рисунок 2.25 – Зависимости средней длительности закрытого состояния переезда от величины межпоездного интервала при различных методах управления АПС: *а* – для однопутного участка перегона; *б* – для двухпутного участка перегона

Из графиков видно, что при управлении устройствами АПС на основе информации о параметрах движения приближающегося к переезду поезда можно

обеспечить повышение реализуемой пропускной способности участка и снизить время простоя потока автотранспортных средств перед закрытым переездом.

Исследование влияния сокращения межпоездного интервала на функционирование железнодорожного переезда могут быть использованы АО «НИИАС» в рамках научных и опытных работ в области совершенствования систем интервального регулирования движения поездов, позволяющих сократить межпоездной интервал на участках с интенсивным движением поездов. Справка об использовании результатов исследований представлена в приложении Е.

2.9 Выводы по главе

1. Разработана имитационная модель функционирования железнодорожного переезда, позволяющая определить длительность закрытого состояния переезда. Исходными данными для построения модели являются: применяемые устройства автоматической переездной сигнализации на переезде, длина и ширина переезда, фактические длины участков приближения и удаления, размеры движения поездов по участку, характеристики движения поездов.

2. Предложен метод оценки параметров работы переездной сигнализации, позволяющий оценить функционирование систем автоматической переездной сигнализации, при котором учитываются размеры движения и характеристики движения поездов.

3. Исследовано влияние изменения величины межпоездного интервала на показатели функционирования железнодорожного переезда. Выявлено, что сокращение межпоездного интервала приводит к существенному увеличению как суммарного времени закрытого состояния за некоторый промежуток времени, так и средней длительности закрытого состояния переезда.

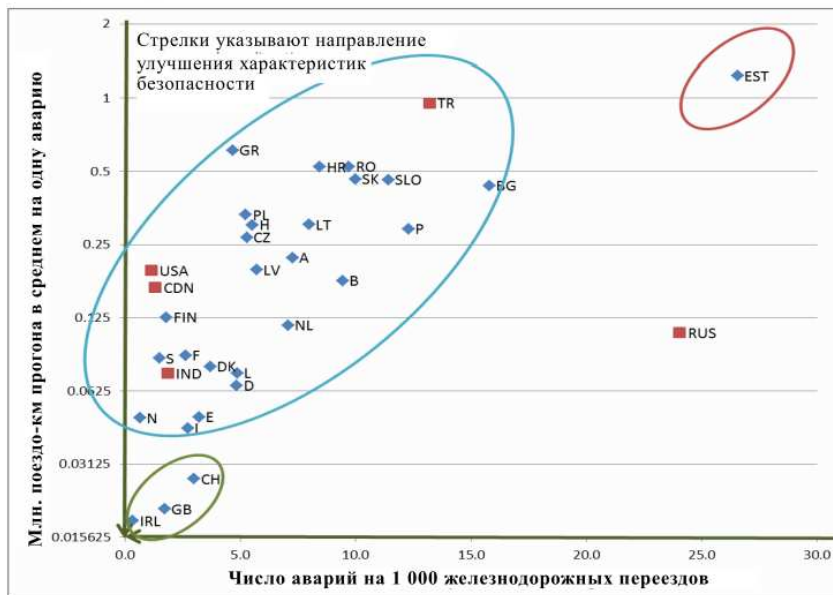
4. Определено, что управление устройствами АПС на основе параметров движения поезда позволяет реализовать потенциально достижимую пропускную

способность как для однопутного, так и для двухпутного участка перегона обеспечивая при этом сокращение времени простоя автотранспортных средств перед закрытым переездом.

Глава 3 Исследование безопасности движения поездов на железнодорожном переезде

3.1 Оценка уровня аварийности на железнодорожных переездах

Уровень безопасности на железнодорожных переездах можно оценить по количеству аварий, приведенных к количеству железнодорожных переездов и пробегу поездов. Низкий уровень аварийности на переезде подразумевает относительно малое количество аварий из расчета на один переезд по отношению к пройденным поездо-км [83]. На рисунке 3.1 представлено сравнение уровня аварийности на железнодорожных переездах в различных странах.

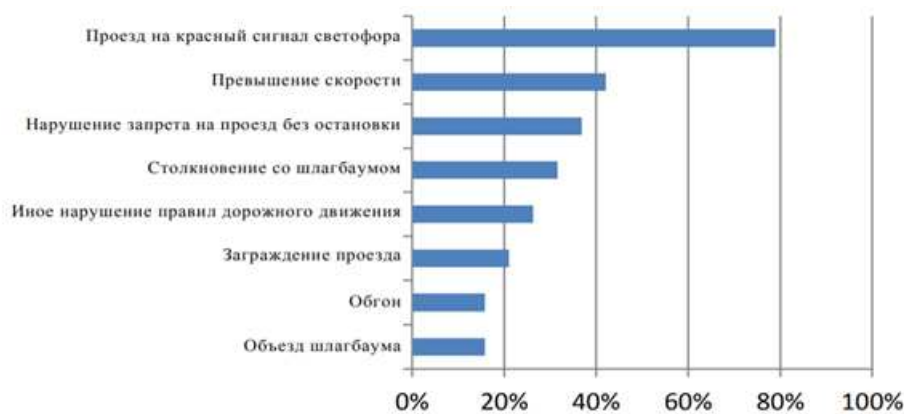


Источник: Базы данных ЕЖДА, Канады и США, данные, предоставленные в распоряжение ЕЭК ООН, расчеты секретариата ЕЭК ООН.

Рисунок 3.1 – Анализ аварийности на железнодорожных переездах в странах-членах Европейской экономической комиссии ООН: соотношение числа аварий и количества железнодорожных переездов по сравнению с величиной поездо-км прогона на одну аварию [83]

Основная причина столкновений железнодорожного и автомобильного транспорта в зоне переезда является игнорирование и нарушение правил безопасности движения на переезде [79, 80]. По данным из доклада Европейской

экономической комиссии наиболее часто наказуемым нарушением на переезде является выезд автомобильного транспорта на железнодорожные пути при закрытом исправном состоянии переездной сигнализации, шлагбаумов и заградительных устройств (рисунок 3.2).



Источник: Данные Европейской экономической комиссии из доклада «Оценка уровня безопасности на железнодорожных переездах в странах – членах ООН», 2017 г.

Рисунок 3.2 – Виды часто наказуемых нарушений на переездах в странах-членах Европейской экономической комиссии ООН [83]

В работе понятие «безопасность движения поездов на железнодорожном переезде» подразумевает свойство железнодорожного переезда функционировать без событий, влияющих на процесс движения поездов. К опасным состояниям процесса движения поездов на переезде относятся:

- торможение (в т. ч. экстренное) подвижного состава с целью предотвращения столкновения с препятствием на железнодорожном переезде;
- столкновение подвижного состава с автотранспортным средством на переезде;
- сход подвижного состава в результате применения торможения с целью предотвращения столкновения с автотранспортным средством на железнодорожном переезде.

В качестве опасных событий, способных привести процесс движения поездов в опасное состояние на переезде, в работе приняты:

- выезд автотранспортного средства на переезд при наличии поезда на участке приближения к переезду;
- проезд автотранспортного средства на красный сигнал переездного светофора;
- объезд автотранспортным средством опущенного шлагбаума.

Согласно существующей методике [81] участок извещения рассчитывается исходя из условий безопасного проезда и полного покидания автомобильным транспортом участка равного длине переезда в случае одновременного наступления следующего события: поезд вступил на участок извещения и автотранспортное средство начало движение по пересечению с железнодорожными путями.

Стоит отметить, что для железнодорожных переездов, оборудованных устройствами заграждения железнодорожного пути, такие события, как проезд автотранспортного средства на красный сигнал переездного светофора после длительного ожидания перед закрытым переездом и объезд опущенного шлагбаума при закрытом работоспособном состоянии переездной сигнализации маловероятны.

Пусть A – событие, при котором возникает опасное состояние процесса движения поездов на переезде, H_1, H_2, \dots, H_n – гипотезы, при которых возможно наступление события A . Тогда вероятность того, что произойдет опасное состояние процесса движения поезда на переезде можно определить на основе формулы полной вероятности [82]:

$$P(A) = P\left\{\sum_{i=1}^n AH_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(AH_i) = \sum_{i=1}^n P(A/H_i)P(H_i), \quad (3.1)$$

где $P(A)$ – априорная вероятность случайного события A ;

$P(A/H_i)$ – апостериорные условные вероятности события A при условии, что наступило событие H_i ;

$P(H_i)$ – априорная вероятность наступления события H_i .

В работе анализируется случай, при котором наступает событие H – одновременного выезда автотранспортного средства на переезд при открытом и работоспособном состоянии устройств переездной автоматики и занятии участка извещения приближающимся к переезду поездом. Тогда вероятность наступления опасного состояния процесса движения поездов на переезде $P(A)$ определяется согласно выражению (3.2):

$$P(A) = P(A/H)P(H), \quad (3.2)$$

где $P(A/H)$ – вероятность того, что в результате выезда автотранспортных средств на железнодорожные пути при приближении к переезду поезда, наступит событие, влияющее на безопасность процесса движения поездов; величина вероятности основывается на текущих показателях безопасности на переезде в стране и принимается зависимой от количества аварий на переезде, нормализованных к количеству переездов и поездо-км пробега поездов;

$P(H)$ – вероятность наступления события H .

На основе открытых данных об аварийности на железнодорожных переездах [83] в Российской Федерации приходится 24 аварии на 1000 переездов за $0,11 \cdot 10^6$ поездо-км. Тогда вероятность, что произойдет событие, влияющее на безопасность процесса движения поездов, на одном переезде за один поездо-км пробега, в результате выезда автотранспортного средства на пересечение с путями составляет:

$$P(A/H) = \frac{24}{1000 \cdot 0,11 \cdot 10^6} = 0,22 \cdot 10^{-6}. \quad (3.3)$$

В качестве зависимой величины в работе принимается значение априорной вероятности наступления события H , вычисление которой возможно с помощью построения стохастической модели взаимодействия потоков железнодорожного и автомобильного транспорта в зоне переезда.

3.2 Разработка стохастической модели функционирования железнодорожного переезда

Функционирование железнодорожного переезда рассматривается как дискретно-событийная динамическая система, поскольку переезд имеет дискретное пространство состояний, зависящее от событий во времени, которые описывают взаимодействие транспортных потоков. Для описания подобных процессов в работе предлагается использовать методы моделирования на основе сетей Петри.

В работах отечественных ученых [73, 84] предложено и обосновано применение сетей Петри для построения моделей движения поездов, в том числе и для оценки времени поиска отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [85]. В работе [86] в качестве математического аппарата исследования процессов функционирования системы автоблокировки рассматривались сети Петри со сдерживающими дугами. В зарубежных источниках авторами предложено применение сетей Петри для оценки эффективности и безопасности системы интервального регулирования движением поездов [87, 88], устройств ERTMS/ETCS [89], а также для построения модели влияния на движение поездов отказов поездной радиосвязи [90].

Сети Петри (СП) первоначально были разработаны как графический формализм для описания параллелизма и синхронизации в распределенных системах. СП задается как кортеж $P_N = (P, T, I, M_0)$, где $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ – конечное и непустое множество мест, $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ – конечное и непустое множество переходов, I – функция перехода, M_0 — начальное состояние системы.

Графическим представлением СП служит двудольный ориентированный граф с двумя типами вершин: условия (места) и события (переходы), характеризующие состояние системы. Функционирование СП описывается множеством изменяющихся согласно условиям событий и множеством достижимых в сети состояний [91].

Однако классические СП не могут быть использованы для анализа количественных и временных параметров. Поэтому более подходящим инструментом для функционального описания моделируемых процессов являются временные сети Петри (ВСП), поскольку при построении ВСП учитывается время реализации событий. В отличие от СП для ВСП возможность наступления очередного события зависит не только от текущего состояния сети, но и от того, сколько времени прошло после наступления предыдущего события [92]. Если изменение состояний моделируемого процесса носит вероятностный характер, то подобные системы описываются с помощью стохастических сетей Петри (ССП).

Среди достоинств применения аппарата СП выделяют:

- возможность моделировать асинхронность и параллельные независимые события;
- возможность построения модели сложных динамических систем;
- возможность анализа отдельных подсистем модели;
- возможность детализации событий происходящих в модели.

Анализ ССП стандартно проводится с помощью Марковских процессов с дискретным множеством состояний. Поскольку используемые статистические данные для построения модели (длины и скорости поездов на перегоне, длины участков извещения к переезду и др.) не являются экспоненциально распределёнными, необходимо при анализе сетей Петри учитывать сложные формы распределения для параметров задержек срабатывания переходов ССП. Поэтому процессы рассматриваются в качестве полумарковских, но система остаётся Марковской, в том смысле, что следующее состояние зависит от текущего состояния, а длительность времени смены событий в системе зависит от заданных условий.

3.2.1 Модель функционирования железнодорожного переезда на основе стохастической сети Петри

Формализация функционирования системы автоматической переездной сигнализации при движении поезда, представленной структурой сети Петри (рис. 3.3), сводится к имитации проследования поезда по участкам зоны переезда с учетом заданных параметров движения [93].

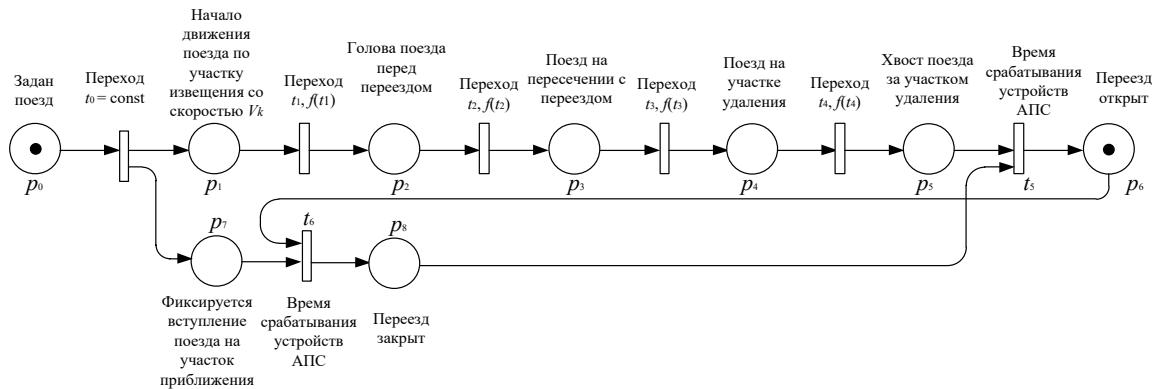


Рисунок 3.3 – Обобщенная сеть Петри, описывающая функционирование переездной сигнализации при движении подвижного состава

Представленная непрерывно-временная стохастическая сеть Петри N имеет множество мест $P_N = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$ и переходов $T_N = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$. При этом переходы t_1, t_2, t_3, t_4 , задаются в виде функции распределения $F_i(x)$, либо в виде плотности распределения $f_i(x)$, поскольку значения времени срабатывания переходов зависят от скорости движения поезда по участкам. Описание условий и событий построенной сети Петри приведено в таблице 3.1, 3.2.

Таблица 3.1 – Описание условий построенной сети Петри

Условия	
p_0	Начальное состояние модели. Задан поезд с параметрами V_k, l_k .
p_1	Поезд вступил на участок извещения к переезду.
p_2	Голова поезда перед переездом.
p_3	Поезд на участке пересечения с автодорогой.
p_4	Поезд вступил на участок удаления.
p_5	Поезд полностью освободил участок удаления.
p_6	Начальное состояние модели. Переезд открыт.
p_7	Путевыми датчиками фиксируется занятие участка извещения к переезду.
p_8	Переезд закрыт.

Таблица 3.2 – Описание событий построенной сети Петри

События	
t_0	По истечении времени t_0 поезд вступит на участок извещения к переезду.
t_1	Когда участок извещения занят, то, по истечении времени t_1 , голова поезда проследует участок извещения $L_{изв}$ с заданной скоростью V_k .
t_2	Когда голова поезда перед переездом, то, по истечении времени t_2 , голова поезда проследует участок пересечения с автодорогой $L_{пер}$ с заданной скоростью V_k .
t_3	Когда поезд находится на участке пересечения с автодорогой, то, по истечении времени t_3 , голова поезда проследует участок удаления $L_{уд}$ с заданной скоростью V_k .
t_4	Когда поезд на участке удаления, то, по истечении времени t_4 , хвост поезда освободит участок удаления $L_{уд}$ с заданной скоростью V_k .
t_5	Когда извещение на переезд не активно и переезд закрыт, то за время t_5 переезд открывается.
t_6	Когда извещение на переезд активно и переезд открыт, то за время t_6 переезд закрывается.

Для рассматриваемого случая (рис. 3.3) в начальном состоянии метки находятся в состояниях p_0 и p_6 , что соответствует условиям, при которых в моделируемой системе задан поезд и переезд открыт. По прошествии времени t переход t_0 срабатывает, что характеризует вступление поезда на участок извещения. Метка переходит в состояния p_1 и p_7 , при этом предполагается, что устройства контроля свободности пути фиксируют занятость поездом участка извещения (рис 3.4).

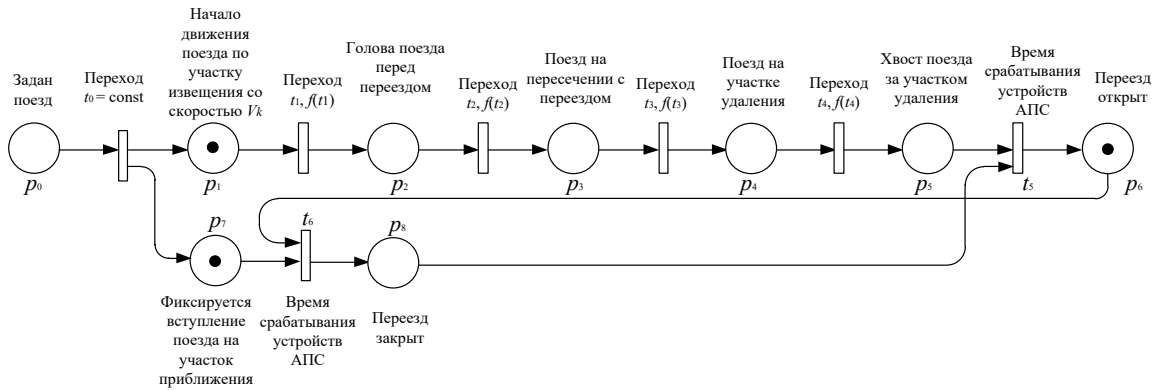


Рисунок 3.4 – Состояние СП, характеризующее вступление поезда на участок извещения

Дальнейшее изменение состояний сети от мест p_1 и p_7 происходит параллельно и не зависимо друг от друга. Срабатывание перехода t_6 приводит к тому, что метка извлекается из места p_6 и помещается в p_8 . Устройства АПС перешли в закрытое состояние – переезд закрыт (рис. 3.5).

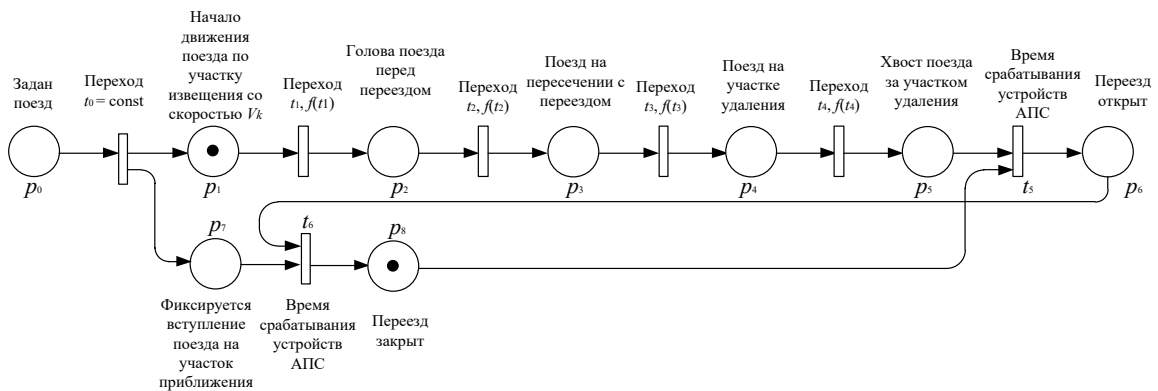


Рисунок 3.5 – Состояние СП, характеризующее закрытое состояние переезда

Поочередное срабатывание переходов $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_4$ описывают процесс движения поезда в зоне переезда. Пока хвост поезда не освободит участок удаления за переездом условие p_6 активно. По заданному правилу функционирования, если метка помещается в p_5 , срабатывает переход t_5 , описывающий изменение состояния устройств переездной сигнализации в открытое состояние.

Графическое построение и анализ сетей Петри возможно с помощью доступных программных инструментов, например CPN Tools [94], Oris Tool [95], Pipe [96] и др.

3.2.2 Методы анализа стохастической сети Петри

К известным методам анализа СП относят [97]: методы редукции и графоаналитические методы анализа состояний.

Применение метода редукции числа состояний на ССП, позволяет получить значения математического ожидания и дисперсий времени достижения состояний [98]. Значения математического ожидания $M(t_k)$, дисперсии $D(t_k)$ и функции плотности распределения $f_k(t)$ любых последовательных переходов из события p_i в событие p_{i+1} определяются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M(t_k) = \sum_i^n M(t_{i,i+1}) \\ D(t_k) = \sum_i^n D(t_{i,i+1}) \\ f_k(t) = f_i(t) \times f_{i+1}(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Результаты анализа можно представить в виде переходных функций, характеризующих пространство достижимых состояний во временной области (рис. 3.6). Полученные кривые показывают, что длительность закрытого состояния переездной сигнализации различны при различных параметрах движения подвижного состава. Ввиду того, что время пребывания в определенном условии построенной сети Петри (рис. 2.4) зависит от задаваемых параметров движения поезда, подобный анализ не удобен при вычислении статистических характеристик, определяющих состояние системы.

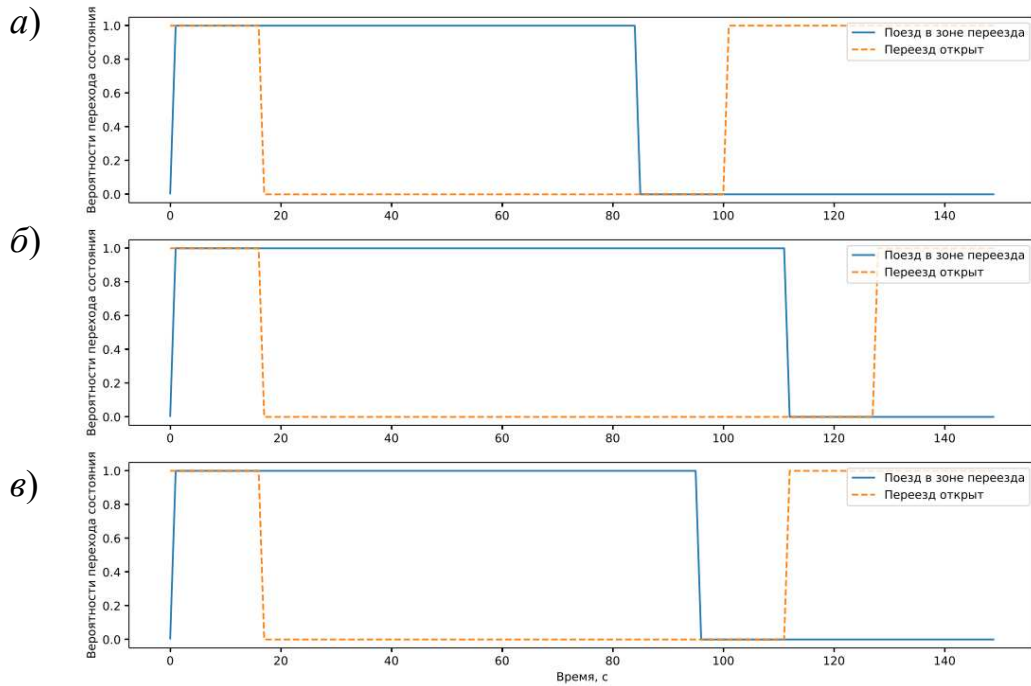


Рисунок 3.6 – Кривые смены состояний моделируемой системы: *а* – для подвижного состава длиной 900 м и с заданной скоростью движения по участкам зоны переезда 120 км/ч; *б* – длиной 900 м и скоростью 90 км/ч; *в* – длиной 500 м и скоростью 90 км/ч

Анализ состояний ССП возможен с использованием аппарата полумарковских процессов. В качестве основного инструмента анализа ССП и получения числовых параметров построенной модели (рис. 3.3) рассматриваются графы достижимости (ГД). ГД составляется (рис. 3.7) на основе матрицы состояний модели (рис. 3.8) и характеризует изменение состояний системы.

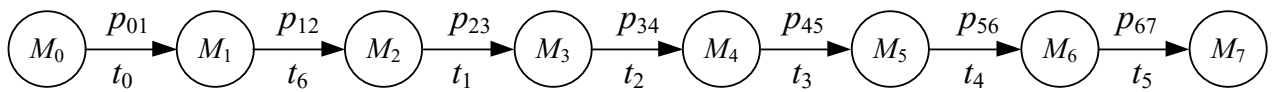


Рисунок 3.7 – Граф достижимости для анализируемой сети

Условия Состояния	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
M_0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
M_1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
M_2	0	1	0	0	0	0	0	0	1
M_3	0	0	1	0	0	0	0	0	1
M_4	0	0	0	1	0	0	0	0	1
M_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1
M_6	0	0	0	0	0	1	0	0	1
M_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Рисунок 3.8 – Матрица состояний

ГД представляет собой непрерывную полумарковскую цепь и описывается следующими параметрами:

- множеством состояний $\{M\}$;
- множеством значений переходных вероятностей p_{ij} из состояния i в состояние j , где $i, j \in M$;
- функцией или плотностью распределения времени пребывания $F_i(t)$, $f_i(t)$ в состояниях.

Стандартный процесс анализа полумарковских цепей достаточно полно изучен в работах [99, 100, 101] и состоит из следующих этапов:

1. Определение переходных вероятностей вложенной цепи Маркова p_{ij} и составление матрицы переходных вероятностей;
2. Определение закона распределения времени срабатывания «быстрого» из активных r переходов i -го состояния:

$$F_i'(t) = 1 - \prod_{i=0}^r [1 - F_i(t)]; \quad (3.5)$$

3. Определение математического ожидания времени непрерывного пребывания процесса в состоянии i , при этом, если время перехода задано функцией распределения применимо выражение (3.6), если задано плотность распределения – выражение (3.7).

$$m_i = \int_0^{\infty} t dF_{ij}(t); \quad (3.6)$$

$$m_i = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt . \quad (3.7)$$

Результаты расчета для состояний $\{M\}$ исследуемого полумарковского процесса в виде вероятностей соответствующих состояний вложенной цепи Маркова (p_i) и математического ожидания времени пребывания модели в состояниях (m_i) представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета

Состояния	p_{ij}	m_i
M_0	0,14	0
M_1	0,14	15
M_2	0,14	64,65
M_3	0,14	0,45
M_4	0,14	7,05
M_5	0,14	20,5
M_6	0,14	15
M_7	0,14	∞

В рамках данного исследования построение и анализ сетей Петри производится с помощью специализированного программного обеспечения Oris Tool. Oris Tool имеет следующие встроенные инструменты для анализа стохастических моделей [102]:

- Недетерминированный анализ – для создания представления множества связанных состояний, которые могут быть достигнуты моделью. Пространство состояний отображается в виде ориентированного графа, где ребра характеризуют активный переход, а узлы – состояния моделируемой системы. Этот анализ полезен для отладки моделей ССП и оценки конечности пространства состояний.
- Переходный и регенеративный анализ – для вычисления переходных вероятностей в обобщенных полумарковских процессах (англ. Generalized Semi-Markov Processes GSMP) и Марковских регенеративных процессах (англ. Markov regenerative processes MRP) соответственно. Эти методы оценивают деревья, в которых ребра помечены переходами и их

вероятностями срабатывания, а узлы представляют собой стохастические классы состояний, включающие маркировку и плотности распределения вероятности времени перехода. Для заданного временного интервала T перебор состояний продолжается до тех пор, пока дерево не покроет срабатывания переходов ССП за время T с вероятностью больше, чем $(1 - \varepsilon)$, где $\varepsilon > 0$ – член ошибки. В то время как переходный анализ перечисляет одно очень большое дерево событий, регенеративный анализ избегает перечисления повторяющихся поддеревьев, уходящих корнями в одну и ту же точку регенерации (где все общие таймеры сброшены или включены на определенное время). Временной шаг используется для выбора равноотстоящих моментов времени, в которых оцениваются переходные вероятности (непосредственно или путем решения уравнений восстановления Маркова).

- Регенеративный анализ установившегося состояния – для вычисления стационарных вероятностей Марковских регенеративных процессов с неприводимыми пространством состояний. Этот метод использует деревья классов стохастических состояний между точками регенерации для вычисления стационарных вероятностей маркировки: ожидаемое время пребывания в каждом дереве комбинируется со стационарной вероятностью регенераций в их корнях. Что касается анализа переходных процессов, то этот метод можно применять к ССП, допускающим использование нескольких общих таймеров в каждом состоянии.
- Анализ переходных процессов при включении ограничений – для вычисления вероятностей переходных Марковских процессов, допускающих не более одного общего перехода в каждом состоянии.

Таким образом, с помощью предлагаемой модели и инструментов можно описать и проанализировать взаимодействие транспортных потоков на железнодорожном переезде, а также исследовать влияние интенсивности движения поездов, автомобильного транспорта и параметров работы переездной

сигнализации на вероятность возникновения опасных событий, приводящих к нарушению безопасного движения поездов.

3.3 Модель взаимодействия потоков железнодорожного транспорта и автотранспорта на переезде

Для численной оценки вероятности возникновения опасных событий на переезде, приводящих к нарушению безопасности движения поездов, построена стохастическая модель взаимодействия потоков железнодорожного и автомобильного транспорта на переезде, расположенного на однопутном участке перегона.

Процесс взаимодействия транспортных потоков на переезде представляется множеством событий, представленных на рисунках 3.9, 3.10,

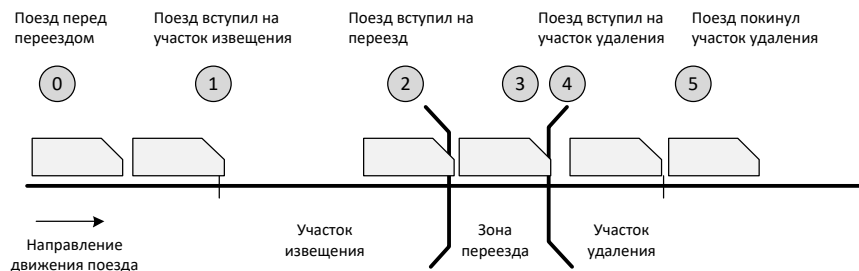


Рисунок 3.9 – Детализация событий при следовании подвижного состава через железнодорожный переезд

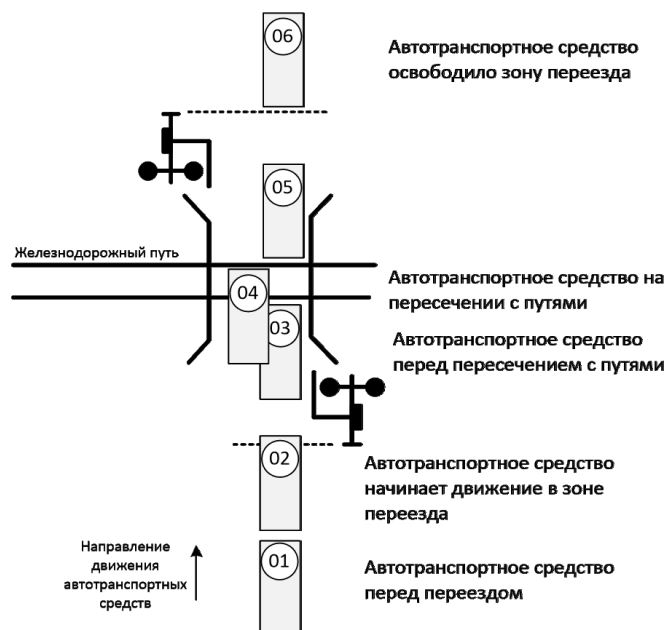


Рисунок 3.10 – Детализация событий при следовании автомобиля через железнодорожный переезд

На основании анализа последовательностей событий на переезде построен двудольным ориентированным мультиграф сети Петри со сдерживающими дугами (рис. 3.11), который описывает взаимодействие потоков железнодорожного транспорта и автотранспорта на пересечении железнодорожного пути перегона с автодорогой. Длительность задержки срабатывания переходов задается распределением случайной величины, которое характеризует время проследования транспортным объектом со скоростью V участка длиной L .

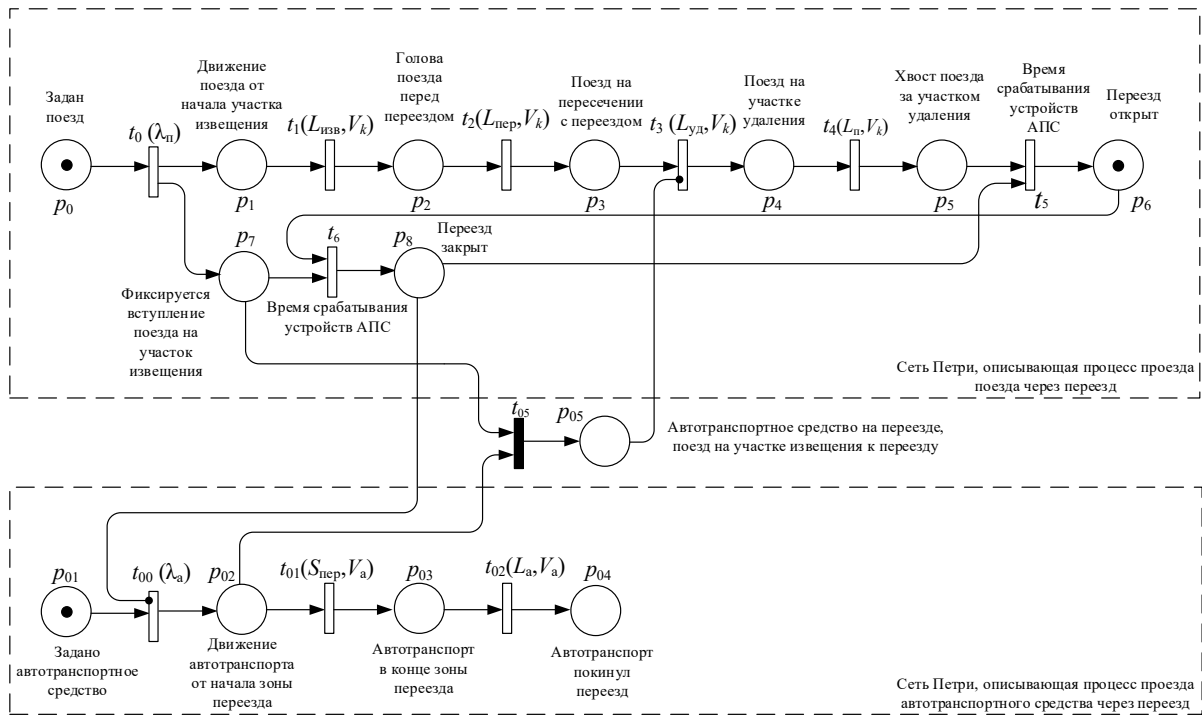


Рисунок 3.11 – Сеть Петри, описывающая взаимодействие потоков железнодорожного транспорта и автотранспорта на однопутном переезде, расположенном на перегоне

При построении модели принято, что время между появлениями двух последовательных транспортных средств перед переездом будет случайной величиной с экспоненциальным распределением. Среднее время ожидания транспортного средства равно $1/\lambda_a$. При этом параметр λ_a может быть интерпретирован как среднее число автотранспортных средств, проезжающих переезд, за единицу времени и характеризовать интенсивность движения.

Переходы t_{01} , t_{02} , описывающие время проследования участка, равному длине переезда $S_{пер}$, и время полного освобождения автотранспорта зоны переезда, т.е. выезд за стоп линию встречного направления, задаются случайной величиной X , распределенной согласно гамма-распределению с положительными параметрами k и θ : $X \sim \Gamma(k, \theta)$. Стоит отметить, что гамма-распределение часто используется для моделирования времени ожидания [103]. Величиной математического ожидания гамма-распределения случайной величины равной $M[X] = k\theta$, задается среднее время проследования участка $S_{пер}$ автотранспортным средством. Причем максимальное значение случайной величины $\max[X]$ принимается при наихудших условиях движения автотранспортных средств через

переезд: минимальным значением скорости $V_a = 8$ км/ч, и максимальной длиной экипажа, принятой равной $L_a = 24$ м. Построенное гамма-распределение с заданными параметрами $M[X] = 5$, $\min[X] = 2$, $\max[X] = 10$ представлено на рисунке 3.12.

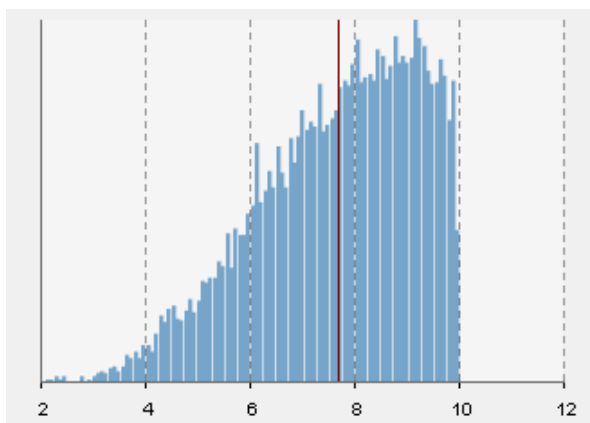


Рисунок 3.12 – Гистограмма случайных величин, распределенных согласно усеченному гамма-распределению $\Gamma(10, 0.7)$, описывает значение времени проследования участка $S_{\text{пер}}$ автотранспортным средством

В таблице 3.4 приведены граничные условия для значений задержки соответствующих переходов анализируемой сети Петри с точки зрения событий при проезде автомобильного транспорта через переезд.

Таблица 3.4 – Описание переходов сети Петр, описывающей процесс следования автотранспортных средств через исследуемый переезд

Переход	Описание перехода	Параметры распределения времени срабатывания перехода
t_{00}	Переход характеризует интенсивность движения автотранспортных средств через исследуемый железнодорожный переезд.	$\text{Exp}(\lambda_a)$ $\lambda_a = 1/60$
t_{01}	Переход, характеризующий время проследования автотранспортного средства участка равной длине переезда $S_{\text{пер}}$. Время проследования зависит от скорости движения автотранспортных средств V_a .	$\Gamma(k, \theta)$: $M[X] = 5$ $\min[X] = 2$ $\max[X] = 10$
t_{02}	Переход, характеризующий время полного освобождения зоны переезда автотранспортным средством. Время проследования зависит от скорости движения V_a и длины автотранспортных средств L_a .	$\Gamma(k, \theta)$: $M[X] = 6$ $\min[X] = 2$ $\max[X] = 10,8$

Среднее время ожидания появления подвижного состава на участке приближения к переезду также задано случайной величиной с экспоненциальным распределением и равно $1/\lambda_{\text{п}}$.

Переходы t_1 , t_2 , t_3 описывают величины времени проследования поездом соответствующих участков: извещения, пересечения с автодорогой, равной ширине переезда, удаления и полного освобождения подвижным составом зоны переезда, равной длине поезда.

Для исследуемого переезда заданы следующие параметры: длина участка извещения $L_{\text{изв}} = 1260$ м, ширина переезда $L_{\text{пер}} = 7,3$ м, длина участка удаления за переездом $L_{\text{уд}} = 249$ м, V_{max} – допустимая скорость на участке – 100 км/ч. На основе анализа статистических данных параметров движения поездов на участке приближения к исследуемому переезду установлены значения средней и минимальной скорости движения поездов на участке: $\bar{V} = 80$ км/ч, $V_{\text{min}} = 45$ км/ч. Тогда математическое ожидание времени проследования головы поезда участка извещения составляет $M[X] = 56,7$ секунд, минимальное время проследования составляет $\min[X] = 45,4$ секунд, максимальное $\max[X] = 100,8$ секунд. Продолжительность срабатывания перехода t_2 задана случайной величиной, описываемой гамма-распределением $\Gamma(k, \theta)$, при этом математическое ожидание времени проследования головы поезда участка равному ширине переезда составляет $M[X] = 0,33$ секунд, минимальное время проследования составляет $\min[X] = 0,26$ секунд, максимальное $\max[X] = 0,6$ секунд. Продолжительность срабатывания перехода t_3 задана случайной величиной, описываемой гамма-распределением $\Gamma(k, \theta)$, при этом математическое ожидание времени проследования головы поезда участка удаления составляет $M[X] = 0,33$ секунд, минимальное время проследования составит $\min[X] = 0,26$ секунд, максимальное $\max[X] = 0,6$ секунд.

Переход t_4 характеризует время проследования хвоста поезда участка удаления $L_{\text{уд}}$. Время проследования зависит от скорости движения поезда V_k и длины состава L_k . Поскольку длина поезда в исследуемой модели влияет только на продолжительность длительности закрытого состояния переезда, величина

задается случайной величиной, равномерно распределенной на интервале $X \in [90; 1430]$.

Продолжительность времени срабатывания устройств переездной автоматики для открытия и закрытия переезда задано случайной величиной, равномерно распределенной на интервале $X \in [13; 15]$.

В таблице 3.5 приведены граничные условия для значений задержки соответствующих переходов анализируемой сети Петри с точки зрения событий при проезде железнодорожного транспорта через переезд.

Таблица 3.5 – Описание переходов сети Петри, описывающей процесс следования железнодорожного транспорта через исследуемый переезд

Переход	Описание перехода	Параметры распределения времени срабатывания перехода
t_0	Переход характеризует интенсивность движения поездов на исследуемом железнодорожном участке перегона.	$\text{Exp}(\lambda)$ $\lambda = 1/960$
t_1	Переход характеризует время проследования головы поезда участка извещения $L_{\text{изв}}$ к переезду. Время проследования зависит от скорости движения поезда V_k .	$\Gamma(k, \theta)$; $k = 2, \theta = 1$ $M[X] = 56,7$ $\min[X] = 45,4$ $\max[X] = 100,8$
t_2	Переход характеризует время проследования головы поезда участка равной ширине переезда $L_{\text{пер}}$. Время проследования зависит от скорости движения поезда V_k .	$\Gamma(k, \theta)$; $k = 2, \theta = 1$ $M[X] = 0,33$ $\min[X] = 0,26$ $\max[X] = 0,6$
t_3	Переход характеризует время проследования головы поезда участка удаления $L_{\text{уд}}$. Время проследования зависит от скорости движения поезда V_k .	$\Gamma(k, \theta)$; $k = 2, \theta = 1$ $M[X] = 11,2$ $\min[X] = 9$ $\max[X] = 44,9$
t_4	Переход характеризует время проследования хвоста поезда участка удаления $L_{\text{уд}}$. Время проследования зависит от скорости движения поезда V_k и длины поезда L_k .	$U(a, b)$; $a = 90, b = 1430$
t_5, t_6	Переход характеризует время срабатывания устройств АПС.	$U(a, b)$; $a = 13, b = 15$

Стоит отметить, что указанные числовые характеристики случайных величин возможно определить с помощью построения имитационной модели функционирования железнодорожного переезда, где в качестве искомых величин указываются длительности пребывания модели в соответствующих состояниях:

поезд на участке приближения, поезд на пересечении с автодорогой, поезд на участке удаления и др.

Искомым событием в построенной сети Петри (рис. 3.11) является условие p_{05} . Переход t_{05} активен при одновременном наличии метки в позициях: p_7 – поезд находится на участке приближения и p_{02} – автотранспортное средство начинает движение в зоне пресечения с железнодорожными путями.

3.4 Влияние интенсивности движения транспортных потоков на безопасность движения поездов

С помощью построенной модели можно оценить влияние интенсивности движения транспортных средств (ТС) через переезд на безопасность движения поездов на переезде. В качестве исследуемой величины принята вероятность появления события, при котором одновременно происходит выезд автотранспортного средства на переезд и срабатывании устройств извещения АПС о приближении поезда к переезду.

По результатам анализа сети Петри при заданной неизменной величине интенсивности автотранспортного потока, равной $1/60$, и независимой переменной интенсивности движения железнодорожного транспорта получены значения $P(H)$ стационарных вероятностей возникновения опасного события (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Результаты вычисления стационарной вероятности возникновения опасного события на переезде

№	Величина интенсивности движения потока железнодорожного транспорта	Величина стационарной вероятности возникновения опасного события
1	1/960 (16 минут)	0,003
2	1/900 (15 минут)	0,003
3	1/840 (14 минут)	0,003
4	1/780 (13 минут)	0,003
5	1/720 (12 минут)	0,004
6	1/660 (11 минут)	0,005
7	1/600 (10 минут)	0,006
8	1/480 (8 минут)	0,006
9	1/360 (6 минут)	0,008
10	1/240 (4 минуты)	0,012

Вероятность возникновения опасного состояния движения поездов на переезде $P(A)$ вычислена на основе формулы (3.2). График зависимости вероятности возникновения опасного состояния движения поездов от величины интенсивности движения потока железнодорожного транспорта представлен на рисунке 3.13.

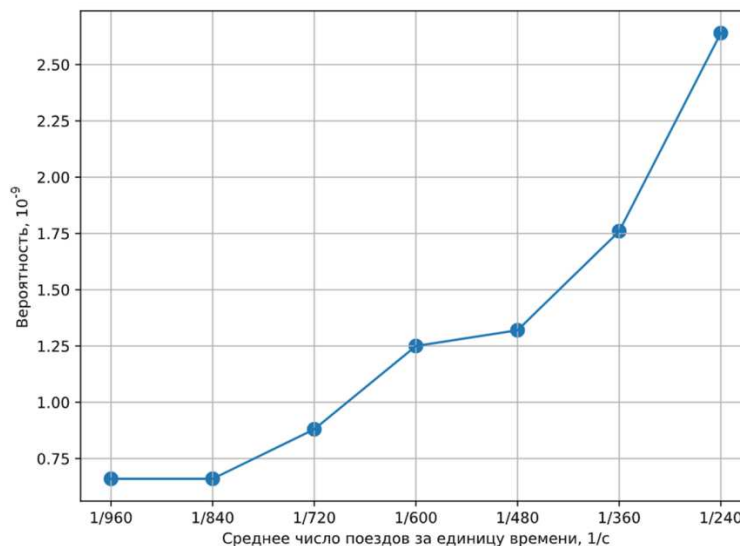


Рисунок 3.13 – Зависимость вероятности возникновения опасного состояния движения поездов на переезде от величины интенсивности движения потока железнодорожного транспорта

Из графика видно, что с уменьшением среднего времени ожидания нового поезда на участке приближения к переезду вероятность возникновения опасного состояния движения поездов на переезде увеличивается.

Аналогичный характер зависимости наблюдается и при увеличении величины интенсивности движения потока автотранспортных средств через переезд. При этом задана постоянная величина интенсивности потока железнодорожного транспорта, принятой равной $1/900$, что соответствует 15-ти минутному интервалу следования поездов. Изменения величины стационарной вероятности возникновения опасного события на переезде представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты вычисления стационарной вероятности возникновения опасного события на переезде

№	Величина интенсивности движения потока автотранспортных средств	Величина стационарной вероятности возникновения опасного события
1	1/300 (5 минут)	0,001
2	1/240 (4 минут)	0,001
3	1/180 (3 минут)	0,001
4	1/120 (2 минут)	0,002
5	1/60 (1 минут)	0,003
6	1/30 (0,5 минуты)	0,006

График зависимости вероятности возникновения опасного состояния движения на переезде от величины интенсивности движения потока автомобильных транспортных средств представлен на рисунке 3.14.

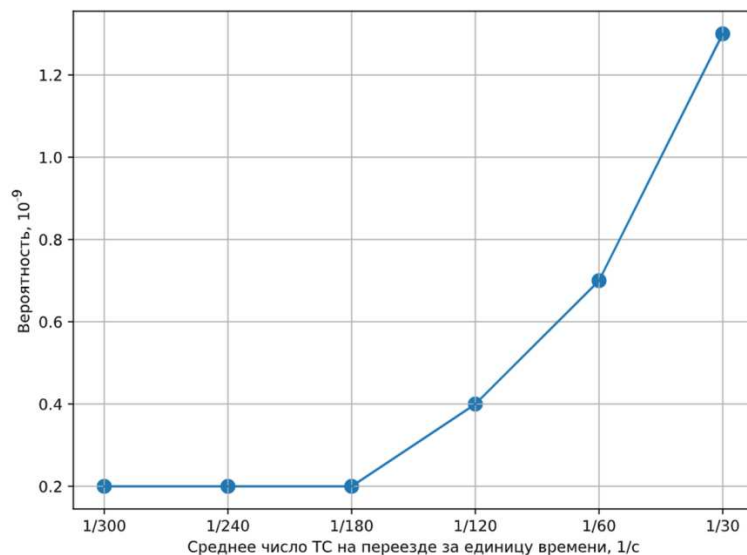


Рисунок 3.14 – Зависимость вероятности возникновения опасного состояния движения поездов на переезде от величины интенсивности движения потока автомобильных транспортных средств

Описанный метод оценки безопасности движения поездов на переезде на основе моделирования с помощью сетей Петри позволяет численно определить вероятность возникновения опасных событий. Отличительной особенностью выбранного метода является то, что при расчете учитываются индивидуальные параметры работы устройств АПС, путевое развитие железнодорожного участка, интенсивность движения поездов и интенсивность движения автомобильного транспорта.

При росте величины вероятности возникновения опасного состояния движения поездов на переезде важным параметром работы устройств АПС становится значение времени подачи извещения на переезд. Поскольку в случае, если время проезда автотранспортным средством участка, равному длине переезда, превышает время следования поезда по участку извещения к переезду, возрастает угроза столкновения поезда с автотранспортным средством.

3.5 Влияние изменения параметров работы АПС на безопасность движения поездов в зоне переезда

К основным параметрам работы АПС относят значения времени подачи извещения и длина участка извещения.

Результаты стохастического моделирования функционирования железнодорожного переезда при изменении длины участка извещения представлены на рисунке 3.15 в виде зависимости. Интенсивность потоков транспортных средств задана постоянной величиной: для железнодорожного транспорта $\lambda_{п} = 1/360$, для автотранспортных средств $\lambda_{а} = 1/60$. Время подачи извещения не изменялось.

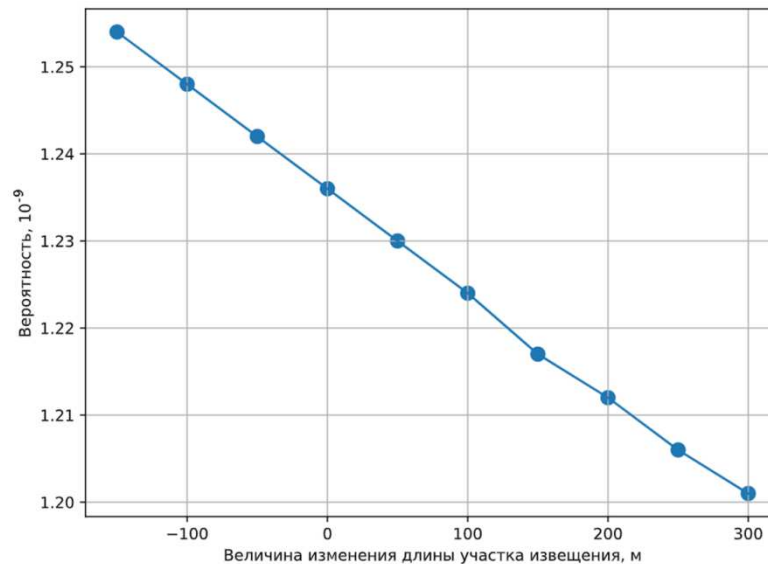


Рисунок 3.15 – Зависимость вероятности возникновения опасного состояния движения поездов на переезде от изменения длины участка извещения

Поскольку изменение длины участка извещения связано с временем следования поезда по участку извещения, увеличение участка извещения приводит к уменьшению вероятности столкновения поезда с автотранспортным средством. При этом переезд закрывается заблаговременно.

Уменьшение длины участка извещения увеличивает вероятность возникновения опасного состояния движения поездов на переезде. Рост связан с тем, что время следования автотранспортных средств больше времени следования поезда по участку извещения.

На основе данных времени следования транспортных потоков в зоне переезда можно оценить вероятность возникновения опасного состояния движения поездов на переезде. На рисунке 3.16 представлены функции плотности вероятности величин длительности времени следования поезда по участку извещения к переезду и времени проезда автотранспортных средств участка, равному длине переезда, аппроксимированных нормальным распределением.

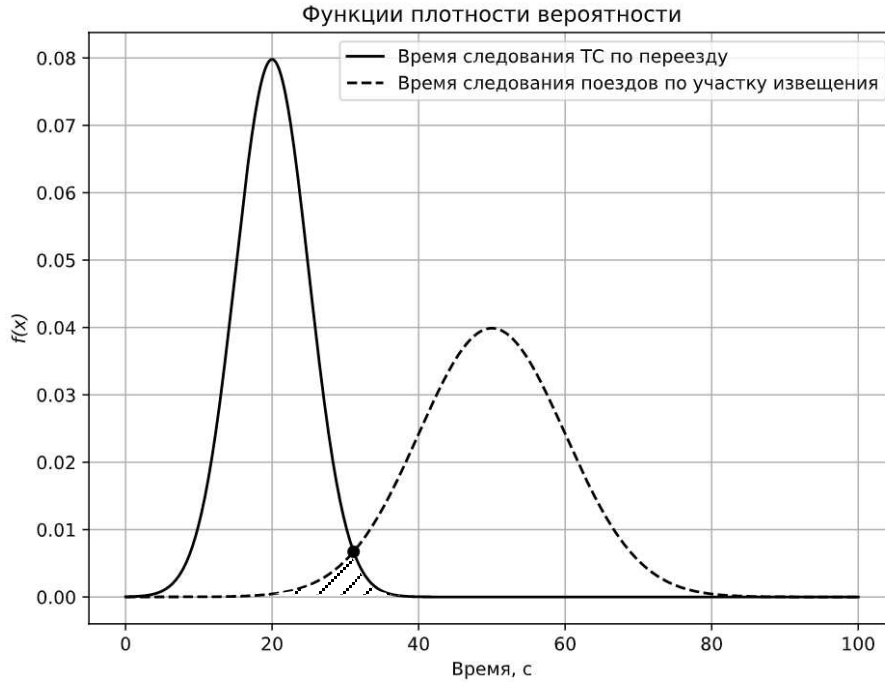


Рисунок 3.16 – Функции плотности распределения вероятности для значений времени следования транспортных средств по переезду и железнодорожного транспорта по участку извещения

Вероятность возникновения опасного состояния, если авто на переезде и поезд на участке приближения, возрастает в условиях, когда величина времени освобождения автомобильным транспортом участка переезда больше времени движения поезда по участку извещения:

$$t_{\text{ос.авто}} > t_{\text{изв}}, \quad (3.8)$$

где $t_{\text{ос.авто}}$ – время необходимое для освобождения переезда автотранспортным средством, сек.;

$t_{\text{изв}}$ – расчетное время извещения на переезд, сек.

Таким образом, вероятность возникновения ситуации, когда автотранспортное средство не успеет освободить пересечение с железнодорожными путями для безопасного проезда железнодорожным транспортом переезда, пропорциональна площади под пересекающимися кривыми функций плотности вероятности: $f_1(x)$ значений времени следования транспортных средств по переезду и $f_2(x)$ – железнодорожного транспорта по участку извещения:

$$P = \int_a^{x_{\min} \in f_1(x)} f_1(x) dx + \int_{x_{\max} \in f_2(x)}^a f_2(x) dx . \quad (3.9)$$

В качестве пределов интегрирования принимаются: точка пересечения функций (a) , минимальное $x_{\min} \in f_1(x)$ и максимальное $x_{\max} \in f_2(x)$ значение соответствующих функций плотности распределения вероятности.

Площадь пересечения кривых для случая, представленного на рисунке 3.16, составляет $P = 0,035$.

Уменьшение длины участка извещения приводит к смещению числовых характеристик случайных величин времени следования поезда (рисунок 3.17).

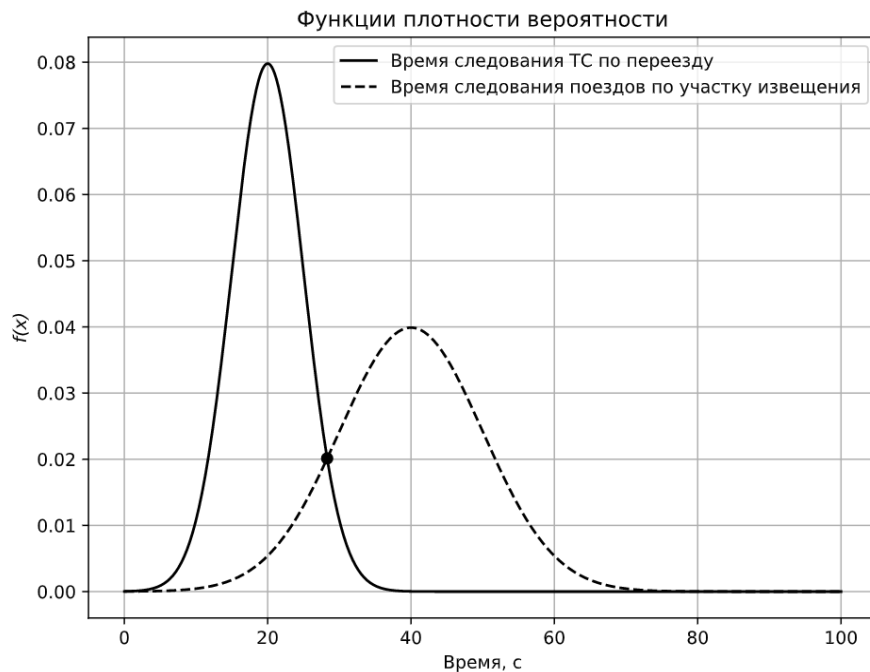


Рисунок 3.17 – Функции плотности распределения вероятности для значений времени следования транспортных средств по переезду и железнодорожного транспорта по участку извещения

Это приводит к увеличению площади под пересекающимися кривыми. Оценка вероятности возникновения ситуации, когда автотранспортное средство не успеет освободить пересечение с железнодорожными путями для безопасного следования поезда, составляет $P' = 0,16$. Следовательно, вероятность столкновения подвижного состава с автотранспортным средством увеличивается при недостаточном времени, необходимом для освобождения переезда автотранспортным средством.

Для соответствия требованиям безопасности на переезде время подачи извещения на переезд должно быть больше или равно времени следования автотранспортного средства зоны переезда. Если значение времени освобождения автотранспортным средством зоны переезда больше, а время следования поезда по участку извещения меньше, возможно возникновение аварийных ситуаций на пересечении. Поэтому при внедрении новых технических решений и систем управления устройствами АПС на переезде необходимо оценивать характеристику времени следования железнодорожного транспорта по участку извещения и автотранспортных средств в зоне переезда.

3.6 Выводы по главе

1. По результатам исследования в данной главе выбран и обоснован метод построения и анализа стохастической модели функционирования железнодорожного переезда, при котором взаимодействие транспортных потоков на переезде представляется в виде временных стохастических сетей Петри со сдерживающими дугами. Модель позволяет учитывать изменение интенсивности транспортного потока и изменение параметров работы устройств переездной автоматики.

2. Разработан метод оценки вероятности возникновения опасного состояния движения поездов на переезде. Обосновано численно, что при увеличении интенсивности потока транспорта, проезжающих через переезд, увеличивается вероятность возникновения опасного события, при котором выезд автотранспортного средства на переезд и срабатывание устройств извещения АПС о приближении поезда к переезду происходит одновременно.

3. Разработан метод вычисления оценки вероятности столкновения железнодорожного и автомобильного транспорта в зоне переезда на основе анализа кривых распределения величин времени следования автотранспортных

средств по переезду и времени следования поездов по участку извещения. Вероятность возникновения аварии возрастает в условиях, когда величина времени следования поезда по участку извещения меньше времени освобождения автомобильным транспортом участка переезда.

Глава 4 Измерение параметров движения поезда с помощью распределенных волоконно-оптических датчиков

Расширение диапазона скоростей поездов на участках и внедрение современных технологий интервального регулирования, таких как «подвижной» блок-участок и «виртуальная сцепка» приводит к тому, что в системах управления движением поездов необходимо располагать не только информацией о местонахождении каждого поезда, но и о скорости, ускорении в режиме реального времени. Стоит отметить, что необходимость в вычислении ускорения движения поезда, позволяющая прогнозировать характер движения, накладывает более жесткие требования к точности измерения скорости.

Настоящий раздел посвящен исследованию системы оптической рефлектометрии распределенных оптических датчиков (OTDR) для решения задачи непрерывного контроля местоположения и определения параметров движения поезда.

4.1 Применение распределенных волоконно-оптических датчиков на железнодорожном транспорте

К традиционным средствам контроля свободности состояния железнодорожного участка как на дорогах общего пользования, так и на железнодорожных объектах промышленного назначения относятся технические решения, основанные на использовании электрических рельсовых цепей и индуктивных датчиков колеса. Существующие ограничения и особенности применения подобных устройств проанализированы в первой главе.

Решить указанные ранее недостатки известных технических решений возможно за счет использования в системах управления движением поездов волоконно-оптических технологий [104, 105, 106].

Следует отметить, что переход от классических электронных к оптоволоконным технологиям позволяет реализовать целый ряд преимуществ. Например, в области оптической связи это широкополосность (свыше 1 ГГц) и малые потери (минимальные 0,154 дБ/км), причем при построении магистральных сетей особое значение приобретает отсутствие взаимной интерференции и безындукционность. Волоконно-оптические датчики характеризуются взрывобезопасностью, высокой электроизоляционной прочностью (например, волокно длиной 20 см выдерживает напряжение до 1000 В), высокой коррозионной стойкостью, а также эластичностью (минимальный радиус изгиба 2 мм) и малой массой (30 г/км) [107].

Существенное влияние на развитие волоконно-оптических датчиков оказало создание в 1970 г. кварцевого волокна с малой величиной затухания. Несмотря на то, что сегодня насчитывается огромное количество разработок, исследований и научных трудов в области оптоэлектроники, распределенные волоконно-оптические датчики остаются одним из наиболее перспективных видов информационно-измерительных систем (ИИС).

В общем случае измеряемое возмущающее воздействие на чувствительный элемент распределенной оптической ИИС приводит к изменению параметров оптической среды (таких как показатель преломления n , коэффициент поглощения света κ , линейный размер l) [108, 109]. Это, в свою очередь, оказывает сложное влияние на распространяющуюся в волноводе световую волну, вызывая изменение ее характеристик. В основу классификации оптических датчиков положено различие в модуляции оптического сигнала. Известные виды модуляции оптического сигнала приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Преобразование изменений параметров оптической среды в изменение характеристик световой волны

Виды модуляции	Изменяемые параметры оптической среды	Изменяющийся параметр оптического излучения
Изменение оптической длины источника излучения	n, l	Фаза
Изменение поперечных размеров волокна		
Изменение отражательной (пропускательной) способности оптического волокна	n, κ, l	Амплитуда
Нарушение полного внутреннего отражения оптического волокна		
Управляемая межмодовая связь оптических волокон		
Введение дополнительного излучение в оптическое волокно		
Поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света	l, n	Угол наклона плоскости поляризации
Нарушение полного внутреннего отражения оптического волокна		

Фазовая модуляция света в волоконном световоде обусловлена главным образом изменением показателя преломления сердцевинки n . Практически всегда интерферометр представляет собой непреходящий компонент волоконно-оптического датчика, использующего фазовую модуляцию света. Чаще всего рассматриваются схемы интерферометров Маха - Цендера и Фабри - Перо, которые подробно исследованы в работах [110, 111, 112]. В то же время недостатком этих интерферометров является низкая помехозащищенность от паразитных возмущений, таких как деформация и флуктуация температуры окружающей среды. Для борьбы с ними требуются дополнительные технические средства, что, в свою очередь, приводит к усложнению схем приемника.

Модуляции длины волны оптического излучения наблюдается в датчиках, построенных на основе технологии волоконных решеток Брэгга (ВБР). Датчики ВБР монтируются на подошве рельса (рис. 4.1) и, таким образом, позволяют определить скорость, ускорение, выполнить счет осей и взвешивание подвижного состава в движении. [113, 114, 115, 116, 117].

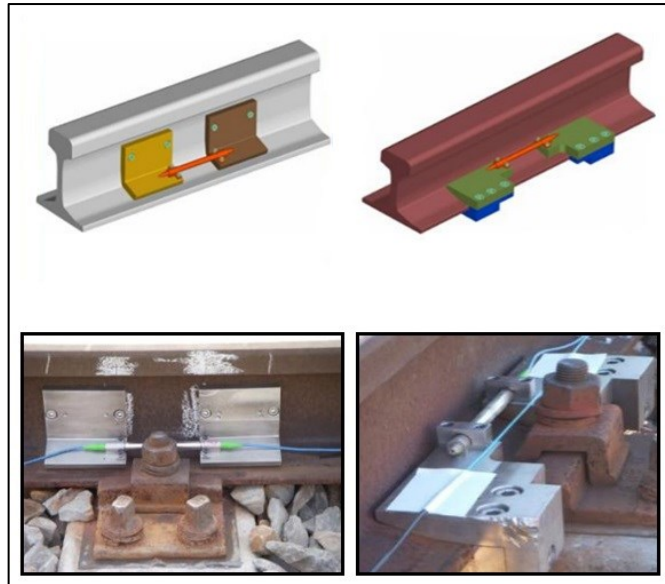


Рисунок 4.1 – Установка волоконно-оптического датчика на брэгговских решетках на рельс

Амплитудная модуляция света в световоде связана, как правило, с появлением дополнительных потерь оптической мощности на микроизгибах волокна. Так, в работе [118] предлагается использовать волоконно-оптический датчик для идентификации подвижных единиц при приложении к его чувствительному элементу внешнего механического напряжения вследствие давления колесной пары. Подобные датчики отличаются не только простотой конструкции, но и применением многомодовых световодов [119].

В световоде поляризационная модуляция связана с появлением двулучепреломления и обусловлена изменением разности фаз между собственными поляризациями. Несмотря на то, что поляризационные ИИС отличаются высокой термоустойчивостью, их применение на электрифицированных железных дорогах затруднительно. В частности, в работах [120, 121] подтверждено влияние электромагнитных полей на угол наклона плоскости поляризации, приводящее к искажению информации об измеряемой датчиком величине.

В последнее время в связи с развитием способов приема и обработки оптических сигналов и ростом интереса к созданию распределенных оптоволоконных ИИС наряду с традиционными амплитудными, поляризационными и фазовыми датчиками стали применяться датчики,

использующие явление рассеяния. Например, на объектах нефтегазовой промышленности [122] и в сейсмологии [123] активно внедряется система мониторинга на основе распределенного акустического зондирования (Distributed Acoustic Sensor — DAS). Перспективная технология DAS находит применение и в железнодорожной отрасли как средство слежения за движением поездов, а также как подсистема, позволяющая выявлять неисправности буксовых узлов подвижного состава и дефекты на поверхности катания колеса. Например, алгоритмы обработки и фильтры системы Frauscher Acoustic Sensing (FAS), разработанной австрийской компанией Frauscher, дают возможность распознавать и классифицировать зарегистрированные сигналы излома рельса, ползуна на поверхности катания колеса, ослабленного рельсового соединителя [124]. В то же время ведутся испытания по определению мест коротких замыканий в тяговых сетях с использованием волоконно-оптических датчиков, проложенных вдоль железнодорожного пути [125].

На железных дорогах Германии исследуются возможности акустического зондирования (Fiber Optic Sensing — FOS) в качестве системы по обнаружению оползней и падения скальной породы на железнодорожный путь, а также по выявлению посторонних лиц на объектах инфраструктуры [126].

В Северной Америке проходят испытания системы акустического детектирования при помощи волоконно-оптического кабеля (Fiber Optic Acoustic Detection — FOAD) как средства мониторинга целостности пути, состояния стыков и рельсовых соединителей. Разрабатываются технические решения по применению FOAD в качестве систем управления автоматической переездной сигнализацией и контроля состояния на переезде при проходе поезда.

В России научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт ОАО «НИИАС» начал внедрять на участках железнодорожных линий со средней и малой интенсивностью систему интервального регулирования движения поездов без рельсовых цепей «Анаконда» [127]. При этом свобода перегона определяется и контролируется методом DAS.

Разработки и исследования ученых и инженеров компании ООО «Т8 Сенсор» в области расширения функциональных возможностей распределенных виброакустических систем показали, что применение системы «Дунай» позволяет решать вопросы как мониторинга железнодорожной инфраструктуры вдоль путей [128], так и точного позиционирования поездов на участках [129].

Кроме того, предлагается использовать оптоволоконную систему мониторинга и диагностики перемещений слоев земляного полотна [130].

На основании проведенного литературного обзора представляется возможным построить классификацию распределенных волоконно-оптических датчиков применяемых для контроля и мониторинга железнодорожной инфраструктуры (рис. 4.2).

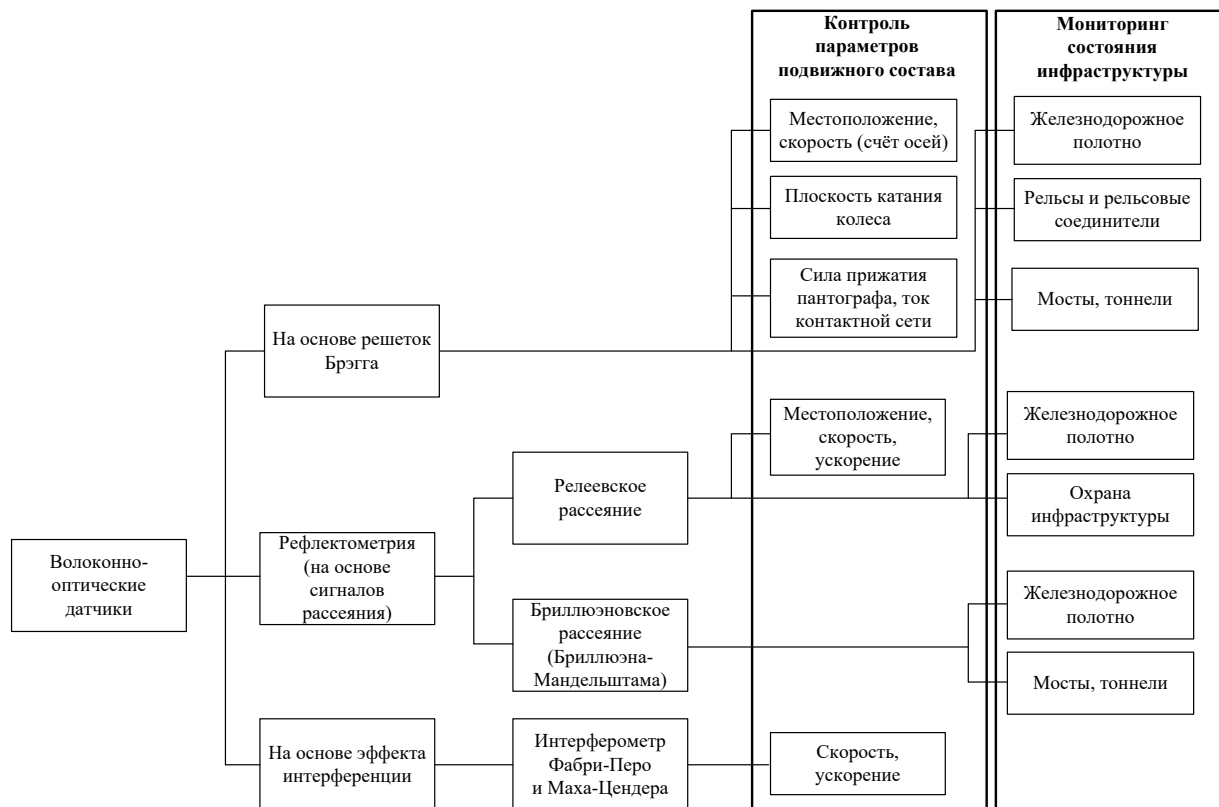


Рисунок 4.2 – Классификация распределенных волоконно-оптических датчиков применяемых для контроля и мониторинга железнодорожной инфраструктуры

Таким образом, для определения места деформации и локального вибрационного воздействия от движущегося поезда можно выделить оптические датчики на основе волоконных брэгговских решетках (FBG), на основе сигнала рассеяния и на основе интерференционных эффектов [131].

4.2 Основы оптической рефлектометрии распределенных оптических датчиков

Основная идея применения датчиков на основе явления рассеяния заключается в том, что колебания на поверхности оптического волокна за счет распространения виброакустических волн от движущегося поезда меняют локальный показатель преломления световода. При этом волокно помещается в землю на определенную глубину и определенное расстояние от объекта мониторинга. Любое, даже незначительное, внешнее воздействие влияет в первую очередь на поляризуемость молекул оптической среды χ . Значение χ имеет случайно флуктуирующую часть диэлектрического параметра $\Delta\varepsilon$. Изменяющийся $\Delta\varepsilon$ дает колебания поляризации излучения света во всех направлениях, как показано на рисунке 4.3. Часть рассеянного света вновь захватывается волноводом и направляется в обратном направлении.

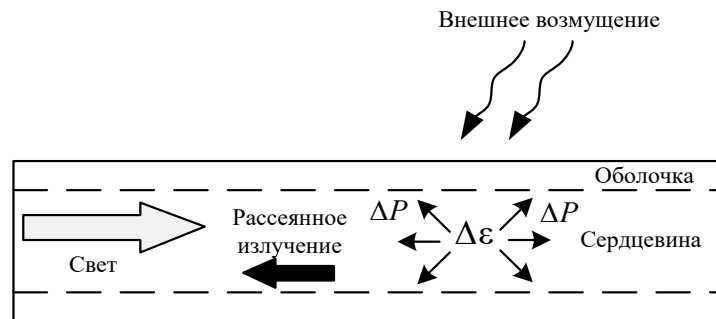


Рисунок 4.3 – Явления рассеяния в оптическом волокне от воздействия внешнего возмущения

Изменение вектора поляризации P ведет к изменению вектора электрического смещения (электрической индукции), который характеризует источники электрического поля, т. е. свободные заряды:

$$D = \varepsilon_0 E + P = (\varepsilon + \Delta\varepsilon)E, \quad (4.1)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε – абсолютная проницаемость;

$\Delta\varepsilon$ – описывает физический механизм спонтанного рассеяния;

E – напряжённость электрического поля.

Тогда из решений уравнений Максвелла, уравнение электрического поля принимает вид [132]:

$$\mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \nabla^2 E - \nabla[E \cdot \nabla \ln(\varepsilon + \Delta\varepsilon)] + \mu_0 \frac{\partial^2 (\Delta\varepsilon E)}{\partial t^2} = 0, \quad (4.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Первые два члена уравнения (4.2) описывают обычный процесс распространения волны в волноводе, а третий и четвертый члены — процесс случайного рассеяния, вызванный колебанием диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon$. При этом колебания диэлектрической проницаемости неразрывно связаны с коэффициентом преломления (4.3):

$$n \sim \sqrt{\varepsilon + \Delta\varepsilon}. \quad (4.3)$$

Описанный выше процесс рассеяния света, обусловленного случайными колебаниями показателя преломления сердцевины оптического волокна n , носит название рэлеевского рассеяния.

Основной метод измерения обратного рэлеевского рассеяния — оптическая рефлектометрия. Оптический рефлектометр впервые был применен для измерений потерь и обнаружения неисправностей в телекоммуникационных оптических кабелях. Его принцип действия основан на том, что в волокно посылаются последовательность коротких импульсов света, и измеряется зависимость мощности рассеянных назад импульсов от времени их запаздывания [133].

Наиболее распространенные методы измерения обратного рэлеевского рассеяния (рис. 4.4) — частотная (OFDR — Optical Frequency Domain Reflectometer) и фазочувствительная рефлектометрия (φ-OTDR — Optical Time Domain Reflectometer). Опрос протяженного датчика с помощью методов рефлектометрии позволяет на основе выходной информации определять пространственные колебания измеряемой величины и, таким образом, получать ее

распределение по длине волокна с точностью, допускаемой пространственным разрешением рефлектометра.

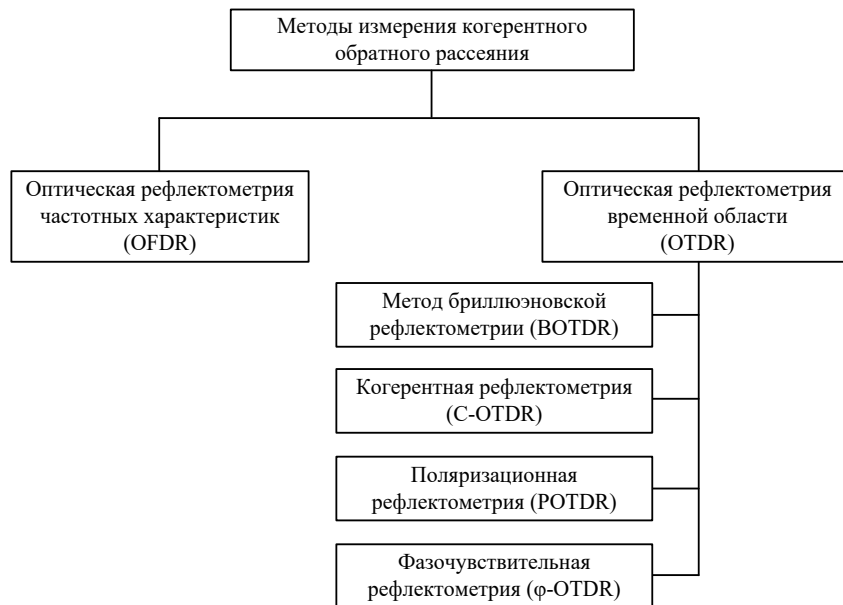


Рисунок 4.4 – Классификация методов измерения обратного когерентного рассеяния

В таблице 4.2 приведено сравнение основных характеристик OFDR- и φ-OTDR-методов измерения обратного рэлеевского рассеяния.

Таблица 4.2 – Характеристики OFDR- и φ-OTDR-методов опроса распределенных датчиков

Характеристика	OFDR	φ-OTDR
Пространственное разрешение	~1 мм	~2 м
Максимальная длина участка измерения	~35 м	~20 км
Время измерения	(0,01–3) с	< 1 мс
Калибровка	Необходима для каждого измерения	Относительное измерение
Требования к источнику излучения	Один узкополосный перестраиваемый лазер	Один узкополосный лазер
Требования к оптическому волокну	Одномодовое волокно	Одномодовое волокно

Таким образом, на основании сравнения, приведенного в таблице 4.2, метод OFDR во многих отношениях не подходит для применения на железнодорожном транспорте, к тому же результаты измерения сильно зависят от температуры

окружающей среды [134]. Наиболее часто для мониторинга протяженных объектов системы DAS используется схема ϕ -OTDR [135], основанная на регистрации когерентного обратного рассеяния Рэлея от чувствительного волокна во временной области.

На рисунке 4.5 представлена общая структурная схема фазочувствительного оптического рефлектометра временной области. Импульсный источник излучения ϕ -OTDR содержит лазерный диод, эрбиевый оптический усилитель, модулятор оптических импульсов; приемник излучения – усилитель и фотоэлектрический преобразователь (ФОП). В ϕ -OTDR излучение от источника усиливается волоконно-оптическим усилителем до необходимой мощности, далее модулятор формирует зондирующий импульс под действием управляющих сигналов программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и драйвера, который через циркулятор попадает в сенсорные каналы. Рассеянное назад излучение направляется циркулятором на предусилитель, который повышает низкую мощность до регистрируемого уровня, а с помощью ФОП оптический сигнал преобразуется в электрический.

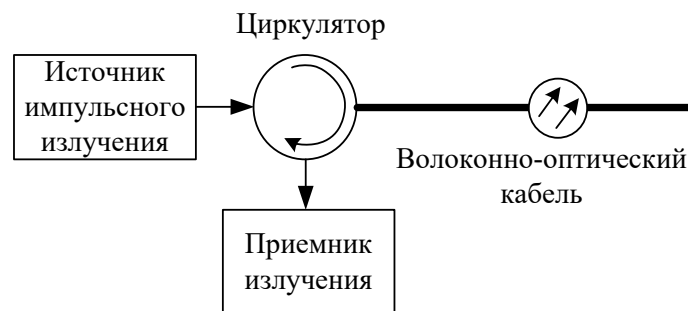


Рисунок 4.5 – Структурная схема фазочувствительного оптического рефлектометра временной области (ϕ -OTDR)

Из-за высокой когерентности используемого лазера упругое обратное рассеяние Рэлея приводит к образованию так называемых стабильных интерференционных структур [136, 137] и функция оптической интенсивности сигнала рассеяния от времени приобретает шумоподобный вид (рис. 4.6).

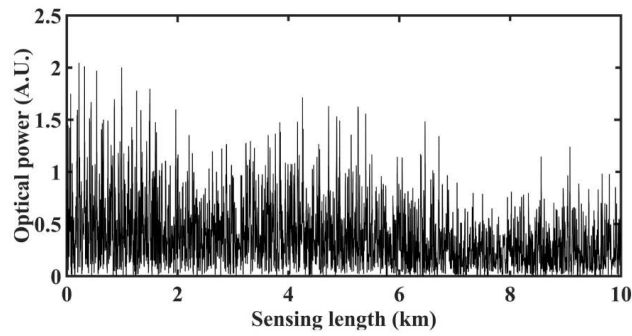


Рисунок 4.6 – Оптическая интенсивность сигнала рэлеевского рассеяния

При приложении возмущения на некоторую область волокна параметры рассеянного сигнала изменяются, следовательно, между двумя последовательными измерениями трассировка ϕ -OTDR будет отличаться (рис. 4.7). Анализ изменения сигнала обратного рассеяния в интерференционной картине дает возможность определить местоположение целевого источника виброакустического излучения.

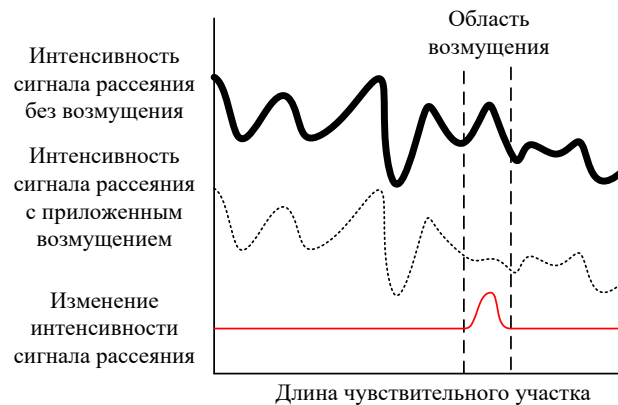


Рисунок 4.7 – Изменение интенсивности в следах обратного рассеяния в месте возмущения [138]

Отметим, что для усреднения и уменьшения шума сигнала обратного рассеяния необходимо получить несколько последовательных измерений. Максимальная частота повторения измерения ограничена временем приема-передачи, заданным $RTT = \frac{2S}{V_g}$, и зависит от длины волоконно-оптического тракта

S и групповой скорости света V_g , представляющей собой отношение скорости

S и групповой скорости света V_g , представляющей собой отношение скорости

света в свободном пространстве и показателя преломления волокна: $V_g = \frac{c}{n}$.

Таким образом, зная длительность импульса и скорость распространения волны в оптическом волокне, мы можем использовать метод когерентной фоточувствительной рефлектометрии для распределенных систем динамического мониторинга в реальном времени.

4.3 Математическое моделирование сигнала фазочувствительного рефлектометра

В силу принципа статистического характера взаимодействия света и вещества, исследование параметров и свойств волоконно-оптических систем принято проводить на основе известной статистической модели [139].

Для получения представления о статистике обратного рассеяния Рэлея, необходимо разработать одномерную модель импульсной характеристики обратного рассеяния единичной амплитуды гипотетического оптического волокна. При этом волокно разбивается на отрезки длиной d , где d – расстояния между условными рассеивающими элементами (рис. 4.8). Сегменты k будут малы по сравнению с длиной оптической волны из-за гипотезы рэлеевского рассеяния. В пределах каждого сегмента отраженные волны будут когерентно складываться и давать результирующий вектор амплитуды обратного рассеяния для k -го сегмента $p_k a_k e^{j\varphi_k}$, где p_k обозначает состояние поляризации, φ_k – фазы, a_k – амплитуды света, рассеянного назад от сегмента k [140].

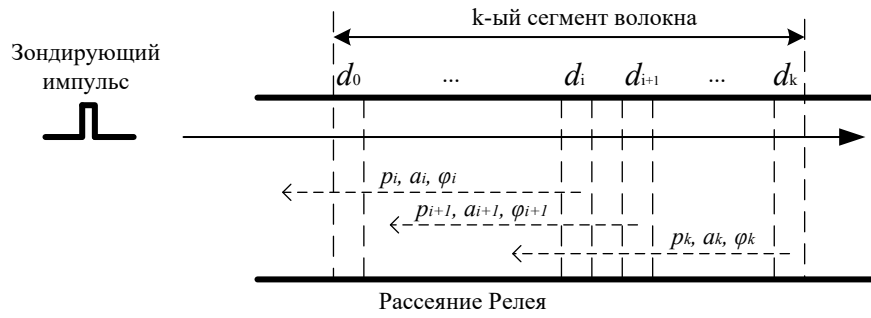


Рисунок 4.8 – Статистическое описание процесса рассеяния в оптическом волокне

Ослабление волокна снижает эффективную величину света k -го сегмента на величину $e^{-2\alpha dk}$, где α – коэффициент затухания амплитуды. Коэффициент «2» учитывает затухание на участке k в прямом и обратном направлении. Таким образом, полная импульсная характеристика обратного рассеяния для всей длины волокна может быть смоделирована как случайный векторный процесс:

$$h(z) = U(z)e^{-2\alpha z} \sum_{k=1}^N p_k a_k e^{j\varphi_k} (z - z_k), \quad (4.4)$$

где z – соответствует расстоянию вдоль волокна;

z_k – местоположение k -го сегмента;

$U(z)$ – прямоугольная функция единичной амплитуды, которая учитывает конечную длину волокна.

Выражение (4.4) также можно записать и во временной области, применяя преобразование переменных:

$$t = 2z/v, \quad (4.5)$$

где v – групповая скорость;

t – время распространения света до точки z и обратно к приемнику.

Таким образом,

$$h(t) = U(t)p(t)a(t)e^{-2\alpha vt}, \quad (4.6)$$

где $a(t)$ – амплитуда рассеяния;

$p(t)$ – характеризует состояние поляризации обратно рассеянного света;

t_k – эффективная относительная задержка k -го сегмента волокна;

$\delta(t - t_k)$ – единичная функция.

Указанная теория математического моделирования рассеянного сигнала в оптическом волокне получила развитие в работах [141, 142, 143]. Так, автором предложено описывать оптическое волокно в виде отдельных рассеивающих участков, а рассеянный сигнал, получаемый при взаимодействии с импульсами света, в виде интерференция полей излучений от центра рассеяния каждого участка.

Стоит отметить, что состояние поляризации излучения $p(t)$ принимается неизменным, поскольку эффект двулучепреломления в оптическом волокне частично восстанавливает степень поляризации [144].

4.4 Влияние вибрационного воздействия от подвижного состава на обратно рассеянный сигнал фазочувствительного рефлектометра

4.4.1 Анализ вибрационных процессов в земляном полотне при движении подвижного состава

Основными параметрами, описывающими вибрационные процессы среды, являются [145]:

- амплитуда колебательной скорости (виброскорость), м/с;
- амплитуда колебаний (виброперемещение), м;
- амплитуда колебательного ускорения (виброускорение), м/с²;
- период колебания, с;
- частота колебаний, Гц.

В научной литературе, посвященной исследованию вибрационных процессов при следовании подвижного состава, выделяют в качестве основной причиной колебаний пути и вибрации неровности на рельсах и колесах, изолирующие стыки. В результате дополнительных сил инерции, которые передают вибрационное возмущение через рельсо-шпальную решетку в балласт,

колебания в земляном полотне при движении поезда имеют широкий амплитудный и частотный диапазон.

В работе [146] исследована амплитудно-частотная характеристика вертикальной составляющей виброскорости грунта основной площадки в сечении под рельсами. При этом наиболее интенсивные вертикальные вибрационные возмущения при движении четырехосных вагонов со скоростью 70 км/ч наблюдается при частотах 40 – 60 Гц, в пределах частот до 120 Гц (рис. 4.9).

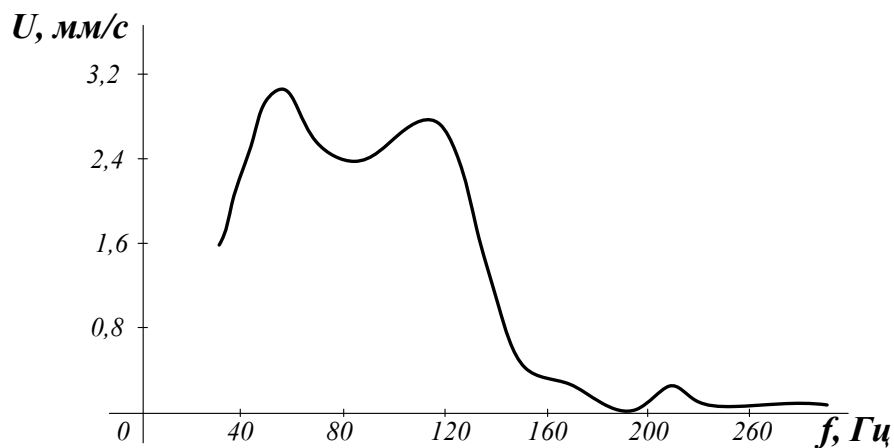


Рисунок 4.9 – Амплитудно-частотный спектр вертикальной составляющей виброскорости грунта основной площадки в сечении под рельсом [146]

Также в работе установлено, что при повышении скоростей движения в прямых участках пути до 120-140 км/ч, горизонтальная поперечная составляющая колебаний начинает превышать вертикальную. Это связано с тем, что при высоких скоростях движения поезда в большей степени начинают проявляться горизонтальные колебания подвижного состава в виде поперечного отбоя и боковой качки [146].

Что касается выявления зависимости динамической нагрузки от скорости проходящей подвижной единицы, то в работах [147, 148] теоретически и экспериментально подтверждается, что повышение скорости движения подвижного состава приводит к росту вертикальной динамической силы и, как следствие, к росту амплитуды колебаний земляного полотна (рис. 4.10).

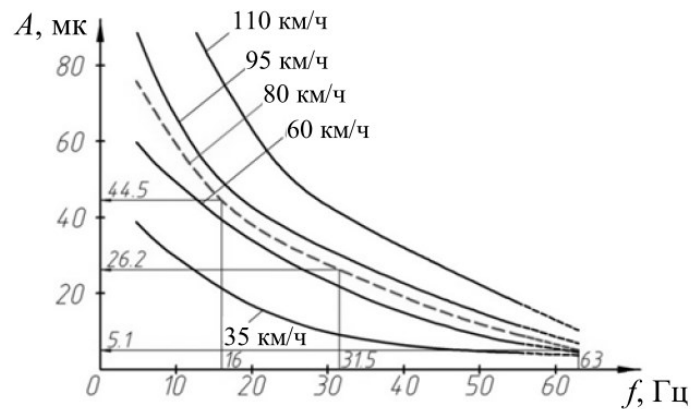


Рисунок 4.10 – Изменение максимальных вертикально направленных амплитуд виброперемещений грунта в уровне основной площадки пути при движении локомотива ВЛ80 [149]

Стоит отметить, что максимальная величина виброскорости грунта наблюдается под рельсами и может составлять значение равное 3 мм/с (рис. 4.11).

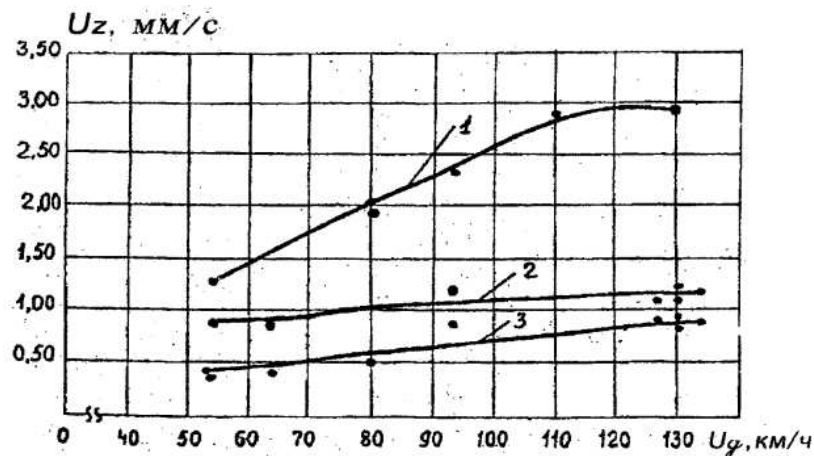


Рисунок 4.11 – Зависимость виброскоростей грунта насыпи от скорости движения поезда [146]: 1 – под рельсом, 2 – на бровке, 3 – на откосе насыпи

Таким образом, исходя из приведенного выше анализа вибрационных колебаний основной площадки под рельсом, можно выделить следующие значимые признаки для идентификации вибрационного воздействия подвижного состава:

- величина амплитуды вертикальных перемещений грунта;
- частотные составляющие спектра колебаний грунта.

Оценить влияние указанных признаков на сигнал ϕ -OTDR возможно с помощью построения численной модели обратно-рассеянного излучения [150].

4.4.2 Описание изменения фазовых соотношений обратно рассеянного излучения распределенного датчика при вибрационных воздействиях от подвижного состава

В одномодовых волоконных световодах при однородной деформации всего сечения световода (в случае вибрационного воздействия это соответствует ее распространению перпендикулярно оси световода) изменение фазы излучения, распространяющегося по световоду, происходит за счёт основных механизмов [105, 106]:

- изменение длины световода Δl ;
- изменение диаметра световода Δd ;
- изменение показателя преломления (фотоупругий эффект).

Величина фазового сдвига излучения, распространяющегося в однородно-деформированном световоде длиной L , определяется фотоупругостью материала световода:

$$\Delta\varphi \sim P_{\text{эф}} \sqrt{\frac{\varepsilon_s L}{d^2}}, \quad (4.7)$$

где $P_{\text{эф}}$ – эффективный фотоупругий коэффициент;

ε_s – упругая деформация;

d – диаметр световода.

Уравнение (4.7) показывает, что линейное изменение фазы излучения зависит от уровня деформации и геометрических размеров участка волокна, а нелинейные изменения возникают из-за нелинейных эффектов в волокне, которые в свою очередь приводят к изменению постоянной распространения. Исходя из вышесказанного, изменение фазы под действием приложенных к световоду деформаций описываются в виде:

$$\Delta\varphi = \beta\Delta l + L \frac{d\beta}{dn} \Delta n + L \frac{d\beta}{dd} \Delta d, \quad (4.8)$$

где β – постоянная распространения моды;

- Δl – удлинение световода под действием приложенных сил;
- Δn – изменение показателя преломления световода под действием приложенных сил;
- Δd – изменение диаметра световода под действием приложенных сил.

4.5 Разработка математической модели сигнала распределенного оптического датчика

4.5.1 Упрощенная математическая модель, описывающая взаимодействие приложенного возмущения на сигнал распределенного оптического датчика

Вследствие преобладания поперечных составляющих колебания грунта при движении подвижного состава, рассмотрим распространение вибрационной волны в упругой среде ортогонально оси оптического волокна. Для простоты предположим, что связь между средой, в которой распространяется волна, и оптическим волокном жесткая, так что движение частиц среды и движение соответствующих точек волокна подчиняются одному и тому же закону с одинаковой амплитудой.

На основе результатов исследований, выполненных в работе [151], принято, что колебания основной площадки под рельсами подчиняются гармоническому закону. Поэтому, деформацию волокна, вызванную смещением среды, можно записать во временной области, как:

$$A(x, t) = A \cos\left[2\pi f\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = A \cos[k(x - vt)], \quad (4.9)$$

где $A(x, t)$ – величина возмущения в точке x и в момент времени t ;

A – величина, характеризующая смещение среды при колебании;

f – величина, характеризующая частоту колебания;

k – волновое число;

v – фазовая скорость распространения волны.

При воздействии на сегмент dx световода поперечных деформаций $A(x,t)$ (перпендикулярно оси световода) в нем возникает модулируемое двулучепреломление вследствие преобладания величин фотоупругого эффекта. Поэтому изменение фазы можно представить как $\Delta\varphi = KA(x,t)dx$, где K – константа, учитывающая совокупный вклад механического удлинения волокна и фотоупругого эффекта. Для случая стандартного одномодового волокна $K = 4.6 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ [152]. Тогда максимальное значение отклика на фазовое изменение, вызванное гармоническим поперечным воздействием на участок оптического волокна, имеет вид:

$$\varphi = K \int_0^L A(x,0) dx = KA \frac{1}{k} \sin(kL). \quad (4.10)$$

Стоит отметить, что увеличение частоты колебания возмущений слабо влияет на значение изменения фазы излучения, распространяющегося в световоде (рис. 4.12), в большей степени изменение фазы зависит от величины амплитуды вертикальных виброперемещений среды.

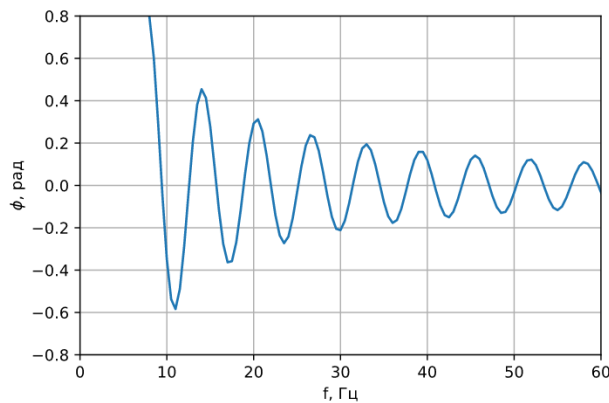


Рисунок 4.12 – Зависимость фазового изменения излучения, распространяющегося в световоде, от частоты колебания возмущения

Откликом фазочувствительного рефлектометра на внешнее воздействие является соответствующее измеренное изменение фазы излучения, рассеянного в обратном направлении участком оптического волокна. Для любого бесконечно малого отрезка волокна dn , подвергнутого деформации, дополнительное

изменение фазы излучения примем в качестве величины приращения: $\Phi(n,t) = \varphi_0 + \Delta\varphi$. Тогда, согласно уравнению (4.4) обратнорассеянное излучения может быть представлено следующим выражением: $E(n,t) = A(n,t) \exp[j\Phi(n,t)]$.

В ф-OTDR обратно рассеянное излучение регистрируется фотоприемником. В каждый момент времени на фотоприемник приходит волна, представляющая собой сумму волн, рассеянных от отдельных центров рассеяния в волокне. Поэтому интенсивность на фотоприемнике может быть рассчитана по принципу суперпозиции – электрическое поле в любой момент времени равно сумме всех индивидуальных полей центра рассеяния [153]:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T E(n,t)^2 dt. \quad (4.11)$$

Таким образом, интенсивность может быть описана следующим выражением:

$$I = \sum_i^N \frac{A(i)^2}{2} + \sum_i^N A(i) \frac{\sin(\Delta\omega + \Phi(i)) - \sin(\Phi(i))}{\Delta\omega}. \quad (4.12)$$

Сигнал интенсивности обратного рассеяния, полученный по результатам численного моделирования, представлен на рисунке 4.13. Сигнал представляет собой зарегистрированные фотоприемником уровни интенсивности рассеянного излучения от N -го центра рассеяния оптического волокна.

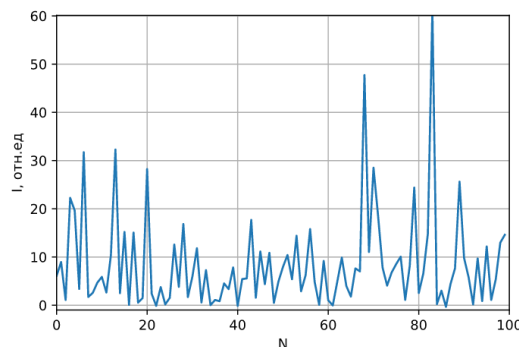


Рисунок 4.13 – Результат моделирования процесса рассеяния

Поскольку среднее значение интенсивности обратно-рассеянного излучения не зависит от характеристик и изменения состояния поляризации

излучения [154, 155, 156], сигнал может быть представлен в виде плотности распределения значений интенсивности. Поэтому для оценки верности модели построен график функции, характеризующий распределение интенсивности для смоделированного сигнала (рис 4.14).

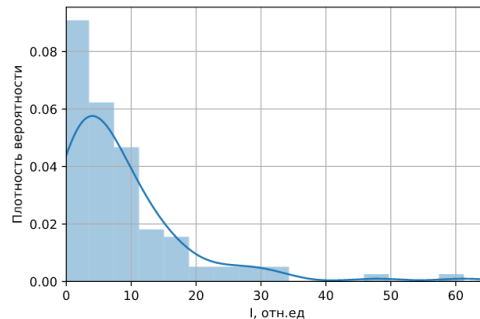


Рисунок 4.14 – Кривая плотности вероятности распределения интенсивности рассеянного излучения

Полученная кривая близка к экспоненциальному виду, что соответствует распределению интенсивности обратно-рассеянного излучения полупроводникового лазера в одномодовом оптическом волокне [140, 154].

4.5.2 Исследование влияния параметров колебания возмущения на сигнал распределенного оптического датчика

Величина воздействия, характеризующее колебание грунта от движущегося подвижного состава, описывается согласно формулам (4.9, 4.10). На рисунке 4.15 красная кривая соответствует изменению интенсивности сигнала обратного рассеяния без внешнего воздействия, синяя линия – интенсивности сигнала при заданном воздействии на некотором участке распределенного датчика.

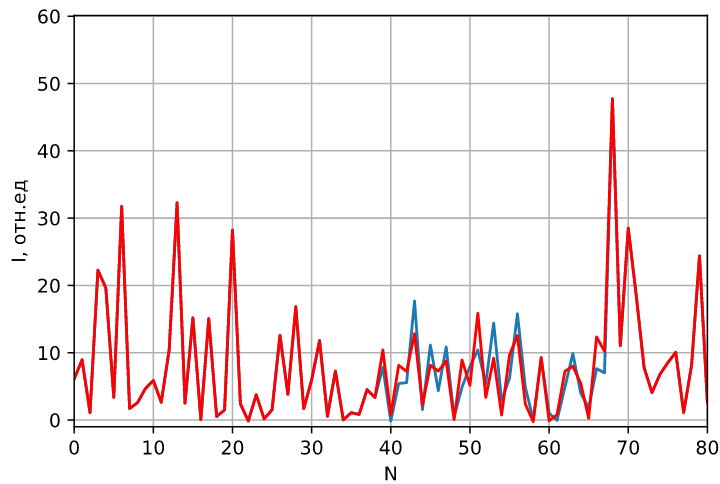


Рисунок 4.15 – Результат моделирования влияния воздействия на сигнал обратного рассеяния распределенного датчик

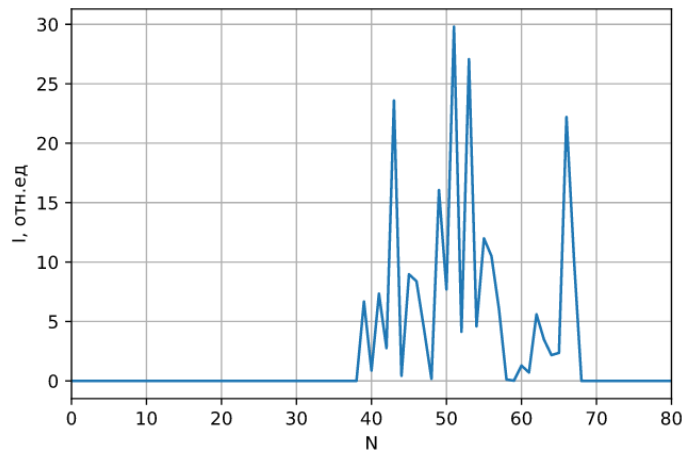
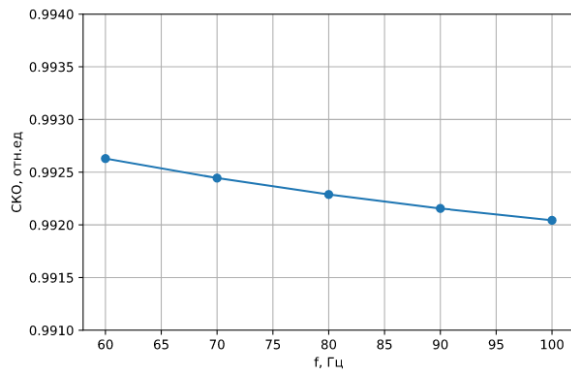


Рисунок 4.16 – График характеризующий отклонение величины интенсивности сигнала при возмущении

С помощью построенной модели представляется возможным оценить реакцию системы на различные уровни амплитуд и частот колебаний воздействия. Характер изменения величины отклонения интенсивности сигнала от значений частоты и амплитуды колебания внешнего возмущения представлен на рисунке 4.17.

а)



б)

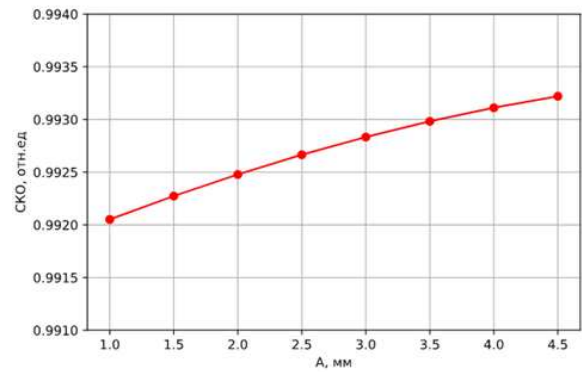


Рисунок 4.17 – Поведение численной модели при различных параметрах колебания: *а* – изменение стандартного отклонения данных в зависимости от частоты колебания; *б* – изменение стандартного отклонения данных в зависимости от амплитуды колебания

Выявлено, что в большей степени изменение фазы излучения, распространяющегося по световоду, зависит от величины приложенной деформации (рис. 4.17, *б*). Таким образом, увеличение скорости движения подвижного состава и амплитуды вертикальных перемещений грунта земляного полотна приводит к большему отклонению интенсивности сигнала, регистрируемого фотоприемником фазочувствительного рефлектометра.

4.6 Разработка методов обработки сигнала распределенного датчика для решения задачи определения параметров движения поезда

Следует подчеркнуть, что ключевым фактором, необходимым для идентификации вибрационного воздействия на распределённый датчик и определения источника, является обработка сигналов рефлектометра. Существующие в настоящее время когерентные рефлектометры позволяют зафиксировать лишь факт воздействия на том или ином участке и его величину, однако сам вид воздействия остается неизвестным [157, 158].

Теоретическим исследованиям методов обработки сигналов рефлектометра посвящено большое количество научных работ. Так, в работах [159, 160]

рассматриваются методы усреднения, при которых последнее измерение вычитается из среднего значения. Однако, несмотря на то, что методы усреднения довольно точно фиксируют единичные возмущения с высоким значением сигнала, для обнаружения вибрации поезда они недостаточно точны из-за сильно изменяющегося отношения «сигнал – шум».

Особое внимание исследователей уделяется использованию спектрального разложения сигнала. Например, метод, основанный на преобразовании Фурье [161, 162], позволяет выделить вибрационные и фоновые составляющие сигнала. В работах [163, 164], где рассматривается применение вейвлет-шумоподавления в обработке сигнала ϕ -OTDR путем введения порога вейвлет-коэффициентов, показано, что вейвлет-шумоподавление позволяет устранить шум, который присутствует во всех частотах.

Приведенные выше методы обработки сигнала распределённых датчиков направлены на решение задачи классификации объектов вибрационного воздействия. Однако в источниках слабо освещены методы, позволяющие на основе сигнала распределенного фазочувствительного датчика определить параметры движущегося объекта. Таким образом, разработка методов обработки сигнала фазочувствительного распределенного датчика для цели определения характеристик движущегося поезда является актуальной.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- предложить метод математической обработки сигнала фазочувствительного рефлектометра;
- предложить метод определения местоположения движущейся подвижной единицы по контролируемому участку;
- предложить метод определения скорости движущейся подвижной единицы по контролируемому участку.

4.6.1 Методы обработки сигнала распределенного оптического датчика

Ввиду наличия в реальном сигнале от распределенного датчика (рефлектограмме) случайных флуктуаций, необходимо использование алгоритмов обработки сигналов.

На рисунке 4.18 представлен смоделированный набор данных, состоящий из четырех измеренных через равные промежутки времени T сигналов распределенного фазочувствительного датчика. При моделировании данных задано локальное динамическое воздействие, описывающее движение поезда длиной L по контролируемому участку пути со скоростью V .

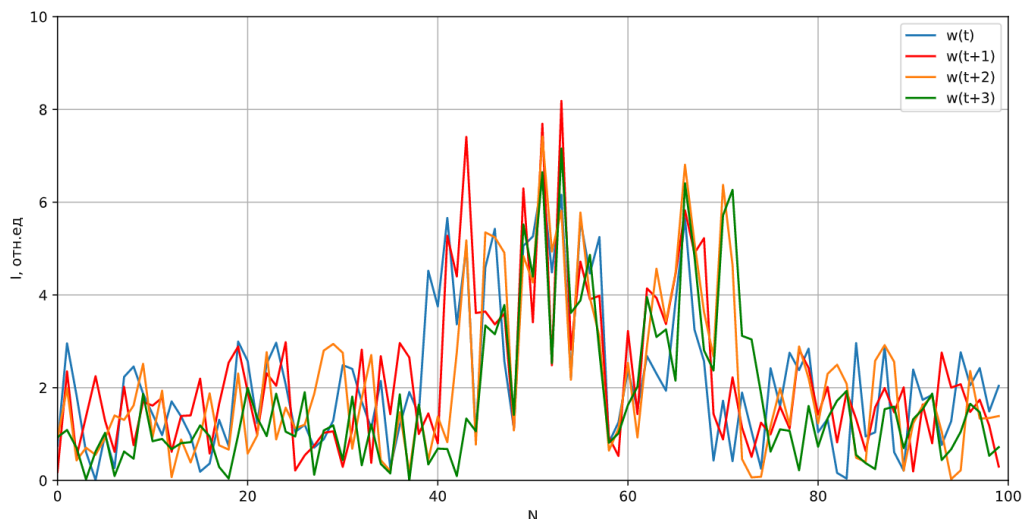


Рисунок 4.18 – Смоделированный набор данных сигнала распределенного фазочувствительного датчика

В работе предлагается применить сглаживание в качестве операции, которая позволяет устранить малые быстрые изменения сигнала. Принцип сглаживания на основе «скользящего среднего» состоит в расчете среднего значения для каждого значения аргумента w_i по соседним данным. Чем больше окно соседних данных, тем больше значимость получаемых усредненных значений.

Сигнал распределенного фазочувствительного датчика представляет собой набор данных $w = \{ w_1, w_2, w_3, \dots, w_i, \dots, w_N \}$, тогда значения «скользящего среднего» в точке i вычисляется по формуле:

$$W_i = \frac{1}{M} \sum_{l=i}^{l=i+M-1} w_l, \quad (4.13)$$

где M – сглаживающий интервал.

На рисунке 4.19 представлен результат сглаживания на основе «скользящего среднего» для двух смоделированных сигналов распределенного фазочувствительного датчика.

Важно отметить, что указанный метод обработки сигнала позволяет выявить область воздействия внешнего возмущения на распределенный датчик.

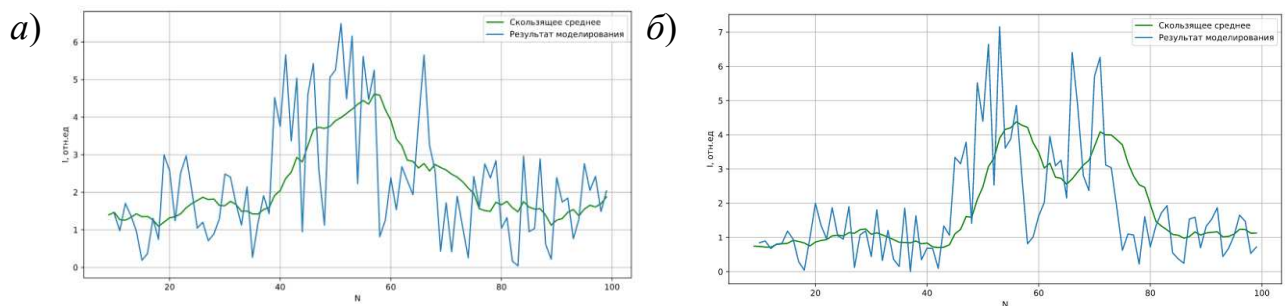


Рисунок 4.19 – Результат обработки на основе «скользящего среднего» смоделированного сигнала распределенного датчика

Результат обработки реализаций сигнала распределенного датчика при задании динамических воздействий от движущегося объекта представлен на рисунке 4.20.

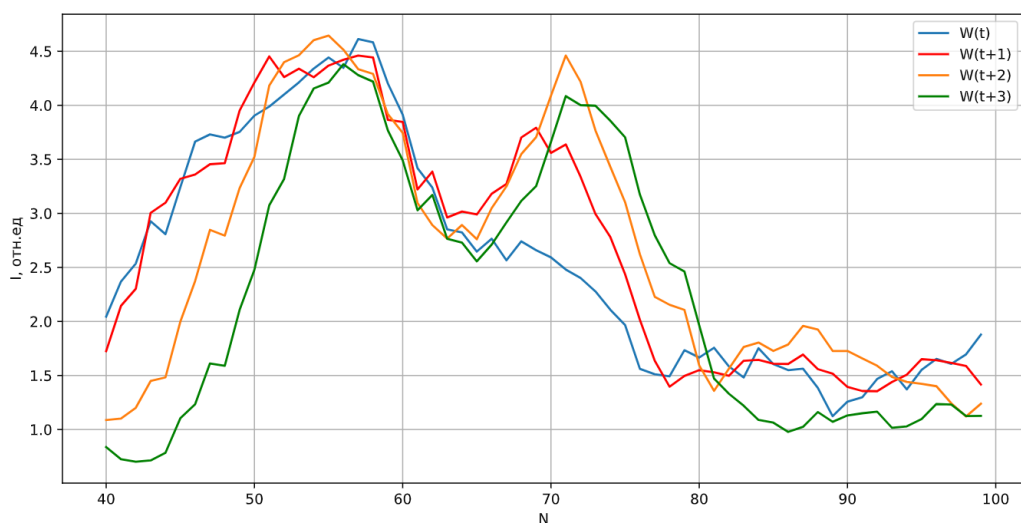


Рисунок 4.20 – Набор данных сигнала распределенного фазочувствительного датчика после обработки

Из полученного графика видно, что изменение области внешнего воздействия, вследствие движения объекта возмущения, приводит к изменению значений пространственной координаты сглаженной функции.

4.6.2 Методы определения местоположения движущегося поезда

Для определения точек воздействия на оптическое волокно по сигналу рефлектометра предлагается применить метод конечных разностей. При этом полученный сигнал от измерительной системы оптической рефлектометрии после обработки методом сглаживания представляется в виде данных наборов точек величины интенсивности обратно рассеянного излучения (I) и соответствующей пространственной координаты (N).

Для дальнейшего анализа полученного массива данных необходимо решить задачу нахождения интерполяционной функции $F(N)$ при этом осуществляется исчисление конечных разностей точек заданного набора, применением нисходящей конечной разности (или разности назад) – разность между i -м и $(i - 1)$ -м значениями функции $f(N)$ в узлах интерполяции, т.е.:

$$\nabla I_i = I_i - I_{i-1} = f(N_i) - f(N_{i-1}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.14)$$

Тогда конечная разность второго порядка принимает вид:

$$\nabla^2 I_i = \nabla I_i - \nabla I_{i-1} = f(N_i) - 2f(N_{i-1}) + f(N_{i-2}), \quad i = 0, \dots, n-2. \quad (4.15)$$

Согласно теореме, определяющей математическое понятие точки перегиба [165], следует, что если некоторая функция $y = f(x)$ имеет в некоторой точке вторую производную и график этой функции имеет перегиб, то значение второй производной в данной точке равно нулю, а в пределах указанной окрестности вторая производная имеет разные знаки слева и справа от точки.

Производная функции f в точке x определяется с помощью предела:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}, \quad (4.16)$$

где h – приращение аргумента x .

Если приращение имеет фиксированное значение, тогда правая часть уравнения (4.4) может быть записана как:

$$\frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \frac{\nabla_h[f](x)}{h}. \quad (4.17)$$

Аналогичным образом можно получить конечно-разностные приближения к производным высших порядков и дифференциальным операторам. Например, принимая во внимание приведенную выше формулу разности (4.15) и применяя формулу разности для производной f' в точке x (4.16), можно получить аппроксимацию разности второй производной:

$$f''(x) \approx \frac{\nabla_h^2[f](x)}{h^2} = \frac{f(x) - 2f(x-h) + f(x-2h)}{h^2}. \quad (4.18)$$

Ввиду того, что дифференциал функции тесно связан с приращением исследуемой функции, для определения точек перегиба в точках искомой функции предлагается анализировать характер кривой конечной разности второго порядка $\nabla^2 I(N)$.

Для определения характерных точек возможно вычисление градиента точек функции $I = f(N)$. При этом градиент вычисляется на заданном массиве данных с шагом, соответствующим пространственной разрешающей способности рефлектометра.

Результат применения предлагаемого метода определения области вибрационного воздействия от движущегося подвижного состава на распределенный датчик представлен на рисунке 4.21.

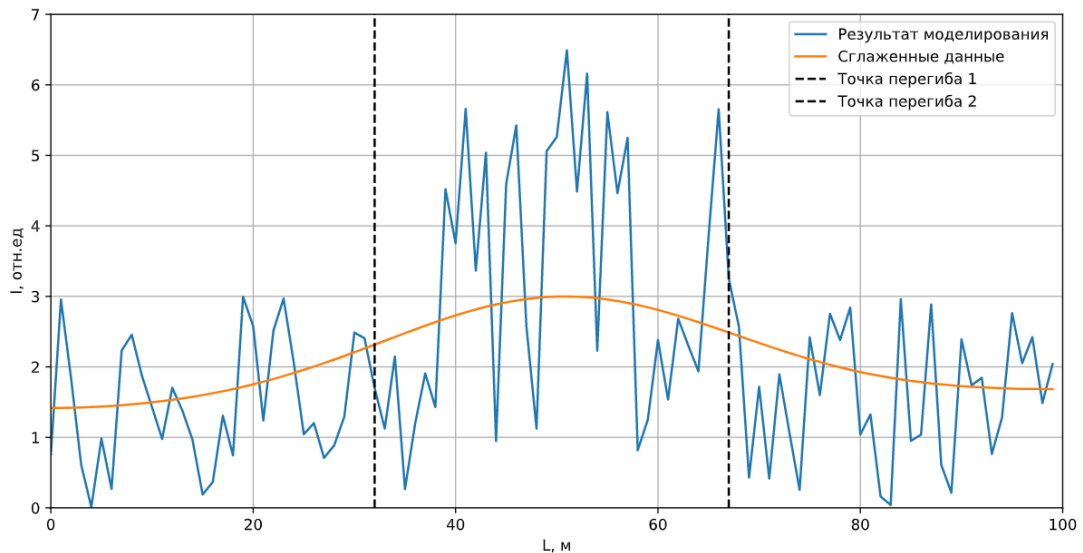


Рисунок 4.21 – Иллюстрация метода определения точек вибрационного воздействия от движущегося подвижного состава на распределенный датчик

Точки перегиба определяют начало и конец искомой области вибрационного возмущения на распределенный оптический датчик.

В рамках исследования разработан программный код на языке программирования Python, позволяющий произвести обработку смоделированных данных сигнала распределенного датчика и определить необходимые величины. Листинг программы, реализующий предлагаемый алгоритм, представлен в приложении Б.

4.6.3 Методы определения скорости движущегося поезда

Исходя из полученных с периодом измерения T и обработанных методом сглаживания сигналов распределенного датчика видно, что в общем случае форма кривых и область динамического воздействия от движущегося объекта не изменяется. С течением времени измерения изменяется только пространственная координата области динамического воздействия. Таким образом, представляется возможным определить величину изменения пространственных координат возмущений.

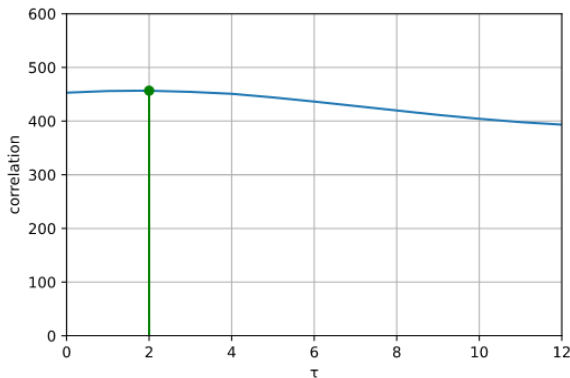
Рассмотрим два усредненных набора данных $W_i(N)$ и $W_{i+1}(N)$ сигнала распределенного датчика период измерения которых равен T . Предполагается, что

за время T произошел сдвиг пространственных координат границ области воздействия на два пункта. Таким образом, сигнал $W_i(N)$ запаздывает относительно сигнала $W_{i+1}(N)$. Известно, что с помощью функции взаимной корреляции можно измерить запаздывание во времени двух сигналов [166]:

$$R_k(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T W_i(N) W_{i+1}(N) dN. \quad (4.19)$$

Полученная корреляционная функция $R_k(\tau)$ сигналов $W_i(N)$ и $W_{i+1}(N)$ представлена на рисунке 4.22. На графике (рис. 4.22, *a*) корреляционной функции наблюдается максимальное значение корреляции при τ равное двум, которое характеризует запаздывание сигналов распределенного датчика друг относительно друга – $\tau(\max[R_k])$.

a)



б)

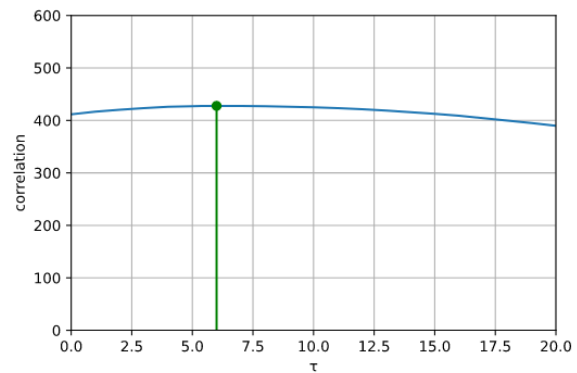


Рисунок 4.22 – Иллюстрация определения величины временного запаздывания между сигналами на основе максимального значения корреляции, *a* – для объекта движущего с большей скоростью, *б* – для объекта движущего с меньшей скоростью

При этом изменение скорости движущегося объекта приводит к изменению величины τ максимума значения корреляции (рис. 4.22, *б*).

Зная период опроса распределённого датчика – T , и величину запаздывания полученных сигналов, возможно определить отношение изменения максимума корреляционной функции $\tau(\max[R_k])$ к изменению независимой переменной T , как:

$$\Delta\tau(T) = \frac{\tau(\max[R_k]) - \tau(\max[R_{k+1}])}{T}. \quad (4.20)$$

Схема определения скорости движущегося поезда на основе сигнала распределённого датчика можно представить упрощенно следующим образом (рис. 4.23):

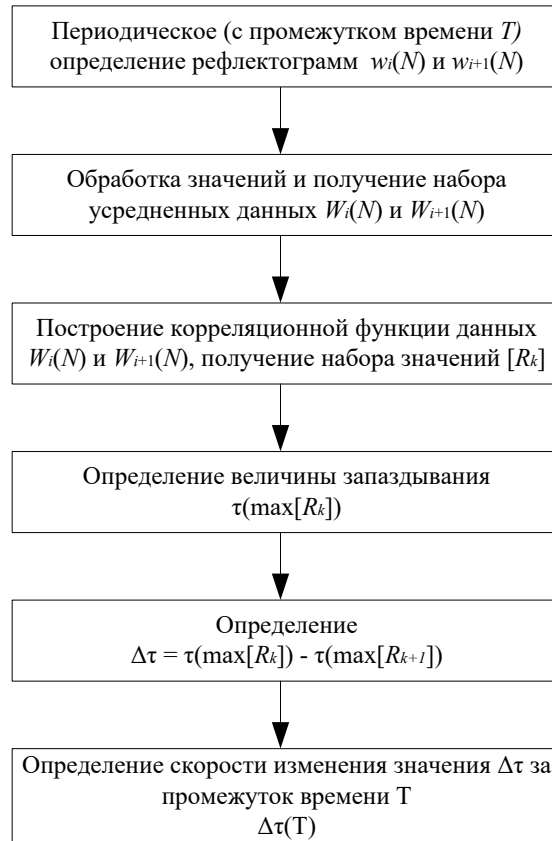


Рисунок 4.23 – Структурная схема процесса определения скорости движущегося объекта на основании скорости изменения коэффициента корреляции между измеряемыми сигналами распределенного датчика

В рамках исследования был разработан программный код на языке программирования Python, позволяющий произвести обработку смоделированных данных сигнала распределенного датчика и определить необходимые величины. Листинг программы, реализующий предлагаемый метод, представлен в приложении В.

4.6.4 Оценка значений параметров движения поезда на основе методов фильтрации

Точные параметры движения x объекта (например, местоположение и скорость) вычислить невозможно, но можно определить приближенную ее оценку \hat{x} на основе измеренного значения z . Поэтому данный раздел направлен на решение задач с целью оценки определяемых параметров:

1. Построение алгоритма оценки параметров движения;
2. Определить критерий качества работы разработанного алгоритма.

Ошибки оценки алгоритма обозначим как: $\varepsilon = x - \hat{x}$, при этом ошибки должны иметь нулевое математическое ожидание и иметь нулевое среднее. Таким образом, критерий качества можно представить в виде квадрата ошибки $R(\varepsilon) = \varepsilon^2 = (x - \hat{x})^2$, при условии минимизации полученной величины:

$$E = M\{(x - \hat{x})^2\} \rightarrow \min. \quad (4.21)$$

Оценка измеряемых параметров возможна на основе методов фильтрации. При этом задача фильтрации (например, на основе фильтра Калмана) состоит в том, чтобы найти оценку вектора состояния системы X_k , обозначаемую как \hat{X}_k и являющуюся функцией измерений Z_k .

Фильтр Калмана работает по системе прогноз-коррекция (рис. 4.24):

1. В момент времени t_{k-1} определяется оценка вектора состояния системы \hat{X}_{k-1} и теперь стоит задача получить оценку в момент t_k ;
2. Строится прогноз оценки \hat{X}_{k-1}^- ;
3. Получение измерения z_k ;
4. Корректировка оценки в момент t_k , на основе прогноза и измерения;
5. Получение окончательной оценки вектора состояния \hat{X}_{k-1}^+ .

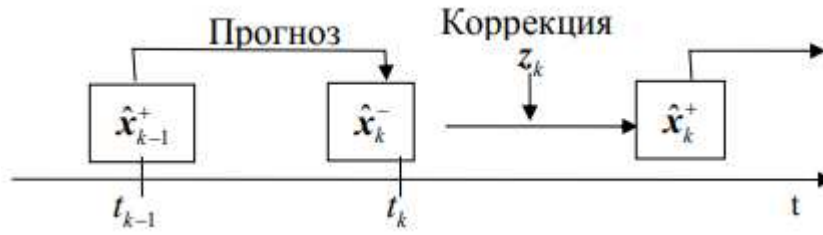


Рисунок 4.24 – Описание принципа фильтрации Калмана [167]

Полученные оценки будут оптимальны при условиях:

1. Шумы в наблюдениях подчиняются нормальному закону распределения (4.22) с нулевым математическим ожиданием μ и некоторой дисперсией σ^2 :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (4.22)$$

Стоит отметить, что шумы в измерениях рефлектограмм подчиняются нормальному закону распределения [168, 169, 170]. Величину дисперсии σ^2 можно определить экспериментальным путем.

2. Модель перемещения объекта описывается с помощью Марковской последовательности, т.е. оценка, полученная на предыдущем шаге, содержит информацию для построения оптимальной оценки на текущем шаге измерения.

Рекуррентную форму фильтра Калмана в дискретном времени можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 4.25. При этом для любого k -го наблюдения рекурсивное определение ошибки оценивания по формуле:

$$P_k = \frac{P_{k-1} \cdot \sigma^2}{P_{k-1} + \sigma^2}. \quad (4.23)$$

Рекурсивное построение оценки измерений представляется выражением:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \frac{P_k}{\sigma_k^2} (z_k - \hat{x}_{k-1}). \quad (4.24)$$



Рисунок 4.25 – Входные данные для фильтрации на k -том шаге измерений

Первое полученное наблюдение представляет собой первую оценку параметра:

$$\begin{cases} z_1 = \hat{x}_0 \\ P_1 = \sigma \end{cases} \quad (4.25)$$

На рисунке 4.26 представлена иллюстрация результата оценки методом фильтрации Калмана значений точек местоположения движущегося объекта, вычисленных на основе сигнала распределенного датчика.

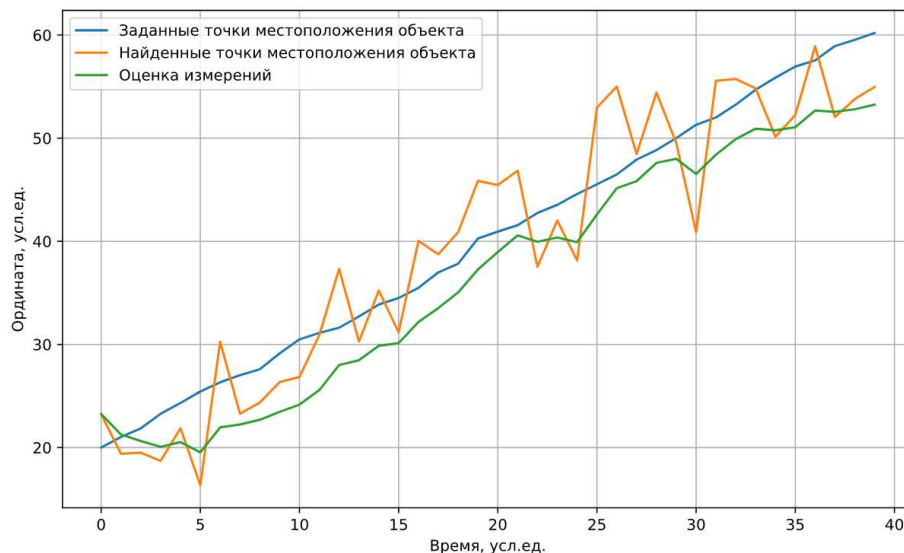


Рисунок 4.26 – Рекурсивное построение оценок точек местоположения объекта с помощью фильтра Калмана

С помощью полученных на основе сигналов распределенного датчика значений скорости V_k , ускорения a_k и точек местоположения движущегося объекта x_k непрерывно изменяющихся по времени t , представляется возможным оценить полученные характеристики движения с помощью фильтра Калмана.

Для расчетов принимается следующая модель перемещения при равноускоренном характере движения (4.26) и модель наблюдения (4.27):

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \dot{x}_{k-1}\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}_{k-1}(\Delta t)^2 \\ \dot{x}_k = \dot{x}_{k-1} + \ddot{x}_{k-1}\Delta t \\ \ddot{x}_k = \ddot{x}_{k-1} \end{cases}; \quad (4.26)$$

$$\begin{cases} z_x = x_k + \eta_x \\ z_v = \dot{x}_k + \eta_v \\ z_a = \ddot{x}_k + \eta_a \end{cases} \quad (4.27)$$

Модель перемещения в векторной форме:

$$\hat{\bar{x}}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{(\Delta t)^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ v_{k-1} \\ a_{k-1} \end{bmatrix}; \quad (4.28)$$

$$\bar{z}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \\ a_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_x \\ \eta_v \\ \eta_a \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

При этом для любого k -го наблюдения рекурсивное определение ошибки оценивания определяется по выражению:

$$P_k = P_{k-1} \cdot R_k \cdot (P_{k-1} + R_k)^{-1}, \quad (4.30)$$

где R_k – матрица дисперсии шума (4.19).

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_{\eta_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\eta_v}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\eta_a}^2 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

Следовательно, рекурсивное построение оценки измерений представляется выражением:

$$\hat{\bar{x}}_k = \hat{\bar{x}}_{k-1} + P_k \cdot R_k^{-1} \cdot (\bar{z}_k - \hat{\bar{x}}_{k-1}). \quad (4.32)$$

На рисунке 4.27 представлен результат построения оценки измерений методом фильтрации Калмана для значений ординат, скорости и ускорения

движущегося объекта, вычисленных на основе предлагаемых в работе методов математической обработки сигнала распределенного датчика.

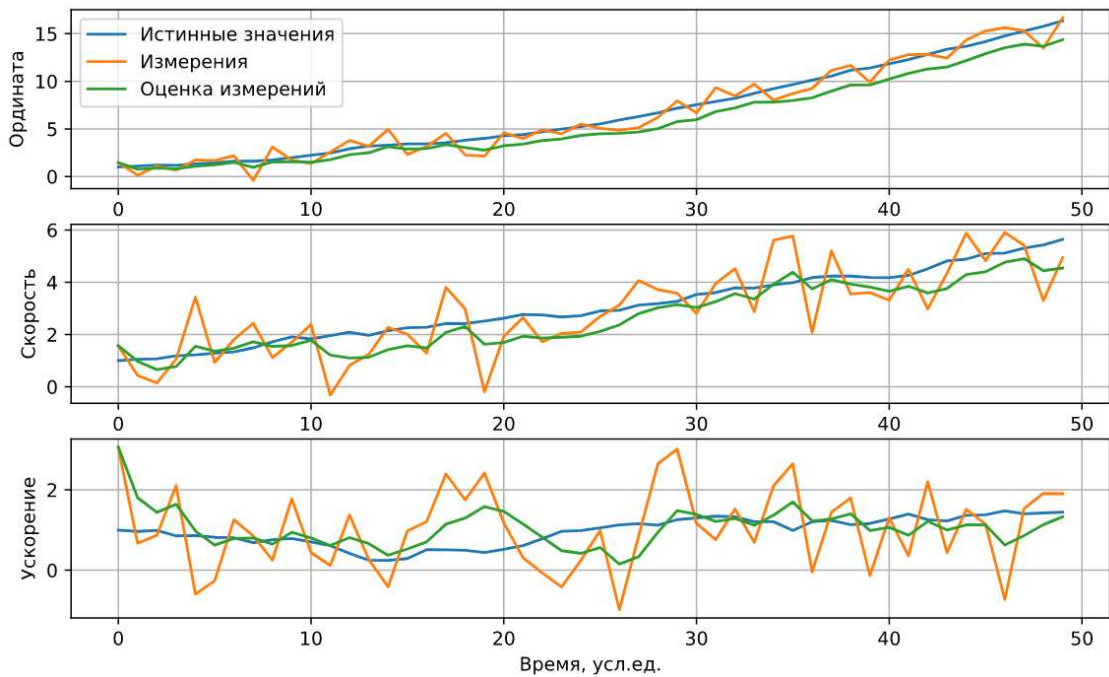


Рисунок 4.27 – Рекурсивное построение оценок измеренных значений местоположения, скорости и ускорения движущегося объекта с помощью фильтра Калмана

Оценка точности оценки измерений, полученных с помощью фильтра Калмана, основывается на вычислении средней квадратичной ошибки (4.21). Для расчёта показателя точности S^u сравниваются истинные, заданные в модели движения, значения местоположения (x_k), скорости (v_k) и ускорения (a_k) и результаты, определенные на основе предлагаемых методов измерения (x'_k, v'_k, a'_k) и оценки полученных значений ($\hat{x}_k, \hat{v}_k, \hat{a}_k$).

$$S^u = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (u'_k - u''_k)^2}{n}}, \quad (4.33)$$

где u'_k, u''_k – сравниваемые k -тые значения измерений;

n – число измерений.

В результате средняя квадратичная ошибка относительно истинных измеряемых величин скорости уменьшилась на 50%, а для значений ускорения на

24%. Для значений местоположения (ординат) величина ошибка измерений не изменилась.

Таким образом, с помощью оценки измеряемых величин на основе методов фильтрации Калмана возможно получить более точные значения параметров движения поезда.

4.7 Выводы по главе

1. По результатам исследования в данном разделе предложена статистическая модель, описывающая сигнал фазочувствительного распределенного датчика (рефлектограмма). С помощью предложенной модели исследовано влияние величины параметров вибрационных колебаний движущегося поезда на сигнал интенсивности обратнорассеянного излучения, регистрируемого на фотоприемнике рефлектометра.

2. С помощью построенной модели представляется возможным оценить реакцию системы на различные уровни амплитуд и частот колебаний. Выявлено, что в большей степени изменение фазы излучения, распространяющегося по световоду, зависит от величины приложенной деформации. Таким образом, увеличение скорости движения подвижного состава и, соответственно, амплитуды вертикальных перемещений грунта земляного полотна приводит к большему отклонению интенсивности сигнала, регистрируемого фотоприемником фазочувствительного рефлектометра.

3. Предложен метод на основе вычисления характерных точек перегиба при интерполировании сигнала рефлектометра, позволяющий установить область вибрационного воздействия на чувствительный элемент распределенного датчика.

4. Предложен метод определения скорости движущегося поезда на контролируемом участке, основанный на корреляционном анализе регистрируемых сигналов распределенного оптического датчика.

5. Для оценки параметров движения поезда, вычисленных предлагаемыми методами на основе сигнала распределенного датчика, предложено применение алгоритма фильтрации измерений с помощью фильтра Калмана.

Глава 5 Разработка устройства управления АПС на основе параметров движения поезда

В данной главе проанализированы эксплуатационные вопросы применения распределенных волоконно-оптических датчиков в условиях железнодорожного транспорта. Выделены инструментальные средства обеспечения надежности и точности измерений. Предложено устройство управления АПС на основе измеряемой распределенными волоконно-оптическими датчиками информации о параметрах движения поезда на участке приближения к переезду.

5.1 Концепция обеспечения безопасности устройства управления переездной сигнализацией

В работе [19] обоснован вывод о том, что безопасность является свойством перевозочного процесса и характеризует степень функционирования устройств (систем) ЖАТ. При этом считается, что устройства (системы) ЖАТ безопасны, если процесс их функционирования (в том числе и переход в неисправное состояние) не создает угрозу жизням и здоровью пассажиров, техническому персоналу, обеспечивает сохранность грузов и технических средств транспортной системы [171, 172].

Для соответствия указанным выше условиям необходимо, чтобы в процессе эксплуатации функционирование устройств и систем ЖАТ удовлетворяло следующим свойствам:

- неисправности и отказы элементов устройств и систем ЖАТ должны явным образом обнаруживаться;
- необходимо обеспечить безопасное поведение системы при отказе;
- невозможность накопления отказов.

Поскольку системы управления устройствами переездной сигнализации относятся к классу изделий с функциями безопасности, во всех условиях и режимах эксплуатации должно обеспечиваться сохранение работоспособного и защитного состояния управляемых объектов [173].

Оптические распределенные датчики можно отнести к средствам измерения, поскольку устройство используется в качестве измерителя параметров движения поезда. На основе стандарта [174] к подобным измерительным устройствам должны предъявляться следующие требования:

- датчики должны обнаруживать эксплуатируемые на железных дорогах подвижные единицы в установленных диапазонах скоростей и возможных значений ускорения;
- не допускается пропадание сигнала от оптического распределенного датчика на время более 0,1 с;
- в процессе измерения скорости на контролируемом участке пути на работу оптической системы не должны оказывать влияние иные движущиеся вблизи объекты;
- погрешность измерения скорости должна быть не более 2 % во всем диапазоне измеряемых скоростей;
- любой отказ устройства обнаружения подвижного состава должен приводить к состоянию «участок пути занят».

Поэтому целесообразно поставленную в первой главе диссертационной работы задачу оптимизации (1.10) дополнить ограничениями, связанными с показателями безопасности функционирования и надежности системы.

В качестве показателя безопасности функционирования принимается значение интенсивности опасных отказов λ :

- интенсивность отказов датчика λ_d , в т.ч. устройств и систем, связанных с безопасностью, не должна превышать 10^{-5} 1/ч [175];
- интенсивность опасных отказов изделия, относящегося к устройствам ограждения железнодорожных переездов, λ_n не должна превышать значения 10^{-9} 1/ч [173].

$$\begin{cases} \lambda_d \leq 10^{-5} \\ \lambda_n \leq 10^{-9} \end{cases} \quad (5.1)$$

Кроме того следует учитывать, что целесообразность применения новых систем управления устройствами АПС, которые соответствуют требованиям (1.10) и (5.1), обоснована только в том случае, если достигается абсолютная экономическая эффективность и если дополнительная экономия эксплуатационных расходов за счет увеличения пропускной способности участка и снижения аварийности на железнодорожных переездах окупит затраты на переоборудование и модернизацию устройств переездной сигнализации.

Концепция безопасности предлагаемого устройства управления АПС основана на использовании двухканального измерения и реализации двухканальной независимой обработки сигналов в параллельном режиме с последующим сравнением результатов вычислений. Поэтому при разработке устройства учитываются следующие принципы:

- аппаратное разделение оптических измерительных трактов;
- программный и аппаратный контроль функционирования и исправности каждого канала;
- увязка с объектами управления и контроля осуществляется с помощью схем с несимметричной характеристикой отказов;
- одиночные отказы аппаратных и программных средств не должны приводить к опасным отказам и должны обнаруживаться не позднее, чем в системе возникнет второй отказ.

Критерием опасного отказа устройства следует принять отсутствие поступления информации о параметрах приближающегося к переезду поезда от распределенного оптического датчика при фактической занятости участков пути.

В соответствии с изложенной концепцией схема и программное обеспечение должны проектироваться таким образом, чтобы опасный отказ был возможен только при одновременном отказе нескольких аппаратных или программных элементов.

Стоит отметить, что на системы с технологией мониторинга на основе распределенных оптических датчиков, имеются сертификаты соответствия технических средств обеспечения транспортной безопасности требованиям к их функциональным свойствам, например система «Дунай» производства компании «Т8».

Одним из методов повышения надежности технических систем является метод резервирования, при котором в систему предполагается включать разного уровня избыточность [176].

В литературе выделяются следующие методы резервирования оптических систем:

- линейное резервирование;
- построение кольцевых структур;
- системное резервирование.

Линейное резервирование достигается расширением числа оптических измерительных трактов, путем выделения отдельных световодов. При неисправности одного из трактов система будет осуществлять информационный обмен по резервному каналу.

Кольцевые структуры резервирования наиболее пригодны для построения волоконно-оптических сетей связи.

Системное резервирование предполагает применение в составе системы резервной приемо-передающей аппаратуры.

5.1.2 Обеспечение точности позиционирования объекта с помощью распределенных волоконно-оптических датчиков

Результаты измерений можно оценить путем сравнения с образцовой величиной. Разница между ними определяет точность измерительного прибора. Из-за того, что основными целями использования рефлектометра являются измерение уровней оптической мощности в различных точках волокна и

определение местонахождения этих точек, то точность измерения связана со следующими параметрами:

- точность измерения затухания;
- точность измерения расстояния.

В научной литературе выделяют следующие причины ошибок измерения положения точек оптического волокна методами импульсной рефлектометрии:

- неверное определение начала и конца оптической линии;
- неточность величины группового показателя преломления волокна;
- ограниченная разрешающая способность рефлектометра.

Величины ошибки измерений методом импульсной рефлектометрии, по перечисленным выше причинам, указаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Ошибки измерений методом импульсной рефлектометрии

Причина ошибка измерений	Величина ошибки измерения, м
Ошибка из-за неточности калибровки (неверное определение начала и конца оптической линии).	$5 \times 10^{-5} \times L$
Неточное значение группового показателя преломления, установленное производителем волокна.	$\pm 5 \times 10^{-5} \times L$
Установлено среднее значение группового показателя преломления (значение группового показателя преломления отличается от среднего на величину 0,2 %).	$\pm 10^{-3} \times L$
Ограниченная разрешающая способность рефлектометра.	$\pm 0,5 \pm 2 \times 10^{-5} \times L$

Таким образом, наибольшая величина ошибки измерений определяется пределом разрешающей способности рефлектометра [177].

С помощью методов импульсной рефлектометрии можно определить длину волокна от начала линии до места воздействия на сенсор с точностью порядка нескольких метров [133]. Тем не менее, измеренное значение длины волокна

недостаточно для точного определения координат и местоположения вибрационных воздействий на контролируемом железнодорожном участке.

Погрешность в определении места воздействия на волокно можно уменьшить, представив сигнал распределенного датчика как функцию длины кабеля. Учесть избыток волокна в кабеле возможно при установке в рефлектометре эффективного показателя преломления $n_{\text{эфф}}$. Величина $n_{\text{эфф}}$ рассчитывается на основании заданной длины кабеля L_k , группового показателя преломления волокна n_r (обычно указывается производителем в спецификации на волокно) и длину волокна L_b , измеренного рефлектометром [133]:

$$n_{\text{эфф}} = \frac{L_b \cdot n_r}{L_k}. \quad (5.2)$$

Для определения местоположения движущегося подвижного состава, в том числе и для вычисления параметров движения, необходимо установить соответствие положения точек оптического волокна распределенного датчика к определенным точкам участка пути (ординате). Поскольку длина волокна, уложенного в кабель, обычно превышает длину кабеля, а длина кабеля, в свою очередь, превышает длину трассы.

В научных работах предлагается использовать в составе оптического волокна распределенного фазочувствительного датчика последовательно установленные на определенном расстоянии друг от друга датчики на основе структуры брэгговских решеток (ВБР) (рис. 5.1) [178].

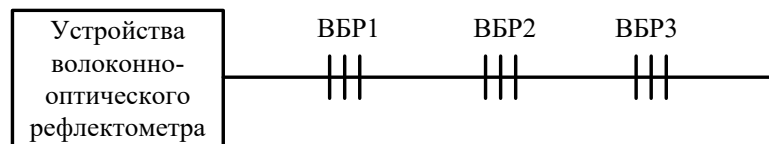


Рисунок 5.1 – Схема рефлектометрического метода опроса ВБР, установленных в оптическое волокно распределенного датчика

Данное решение позволяет уменьшить пространственное разрешение рефлектометра. Рефлектограмма оптической линии, с записанными тремя брэгговскими решетками, представлена на рисунке 5.2, при этом по положению

характерных пиковых значений сигнала интенсивности рассеянного излучения устанавливается ордината точки датчика.

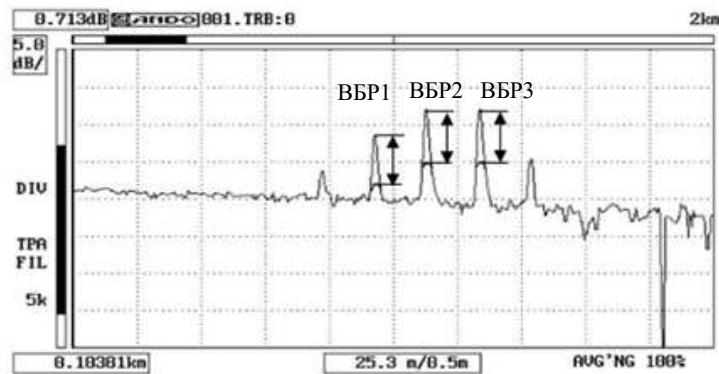


Рисунок 5.2 – Рефлектограмма волоконно-оптической линии с тремя ВБР, записанными с пространственным интервалом 20 м [179]

Недостатком подобных технических решений является необходимость на этапе изготовления чувствительного элемента распределенного датчика записывать брэгговские решетки в оптическое волокно [180]. Стоит отметить, что наличие в оптическом волокне большого числа ВБР вносит дополнительную нелинейность в измерительную систему, поэтому количество мультиплексируемых брэгговских решёток в одной оптической линии ограничено.

Привязку положения точек оптического волокна к местности можно произвести на этапе прокладки кабеля в грунт. Известен метод привязки за счёт кольцевой укладки кабеля (рис. 5.3) [181, 182] в местах опорных геодезических пунктов участка железнодорожного пути (пикетные столбы, светофоры и пр.).

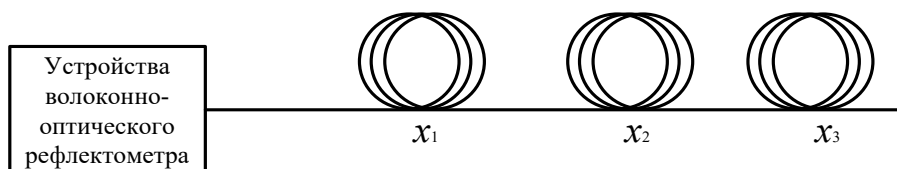


Рисунок 5.3 – Схематическое представление кольцевой укладки распределённого датчика

При этом в точках кольцевой укладки кабеля x_1 , x_2 , x_3 наблюдается повышение чувствительности к локальным воздействиям, а задержки сигнала в катушках оптоволоконна заранее определяются с помощью измерительной установки, включающей эталонную аппаратуру для измерений интервалов времени [183]. Сигнал распределенного фазочувствительного датчика будет иметь также характерные точки повышенного значения интенсивности в соответствующих пространственных координатах оптического волокна.

Таким образом, при применении указанных выше методов представляется возможным корректировать и уточнять местоположение движущегося поезда по контролируемому участку.

5.1.3 Технология прокладки оптического сенсора распределенного датчика вдоль железнодорожного пути

Согласно проведенному исследованию японской компанией *Sumitomo Electric Lightwave* более 50% отказов волоконно-оптических кабелей, проложенных в грунте, приходится на обрыв при проведении земляных работ [184].

Однако расположение оптического волокна в грунт обеспечивает свободную укладку и защиту от прямого внешнего воздействия, при этом наблюдается уменьшение негативного старения и разрушения сердцевины оптического волокна под действием натяжения [185].

Прокладка оптического кабеля вдоль железнодорожного пути для применения в качестве чувствительного элемента распределенного датчика целесообразно осуществлять в грунт, аналогично способу прокладки традиционных медно-жильных кабелей связи, преимущественно с использованием кабелеукладчиков. Как правило, при прокладке используется оптический кабель, содержащий металлические конструктивные элементы только в виде бронепокровов [186]. Однако альтернативой прокладке бронированных оптических кабелей является прокладка оптического кабеля в

защитных пластмассовых трубах [187], например прокладка с применением специализированных защитных полиэтиленовых труб (ЗПТ). При этом технология прокладки не изменяется.

Удобство применение ЗПТ заключается в возможности производить последующую прокладку оптических кабелей без проведения дополнительных земляных работ. При этом используются недорогие и легкие оптические кабели, без металлического бронирования, поскольку ЗПТ обеспечивает требуемую защиту.

Таким образом, указанная технология прокладки для волоконно-оптических линий связи применима и для организации распределенных оптических ИИС вдоль контролируемого железнодорожного участка.

Важным пунктом исследования является вопрос расположения оптического датчика в области нижнего строения железнодорожного пути.

На основании теоретических и экспериментальных исследований характера вибрационных возмущений от движущегося поезда [146], выявлено, что большая часть вертикальных виброперемещений грунта приходится на основную площадку рельсошпальной решетки. При этом наибольшие значения деформации, вне зависимости от материала шпал, типа подвижного состава, скорости движения поезда, зарегистрированы по оси балласта и вблизи рельсов (рис. 5.4).

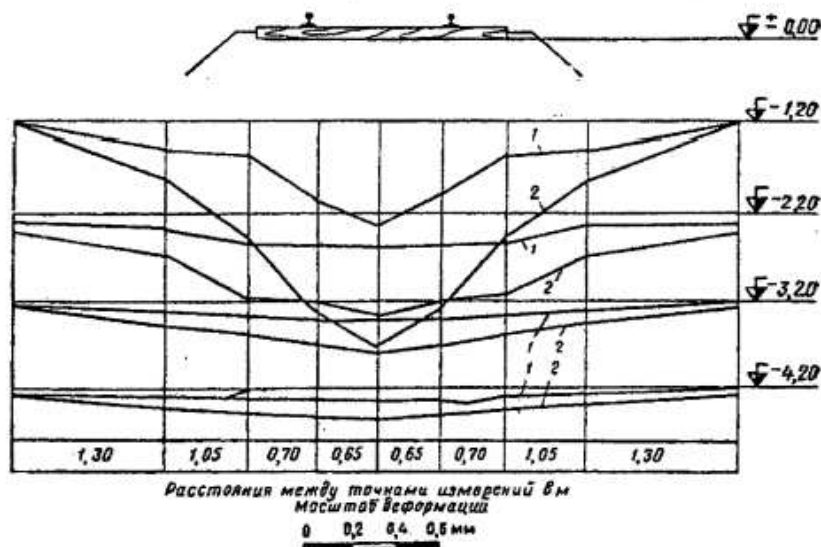


Рисунок 5.4 – Деформация насыпи под воздействием поездной нагрузки [146]

Поэтому при организации участков, контролируемых распределенными оптическими датчиками, целесообразно располагать оптические сенсоры в тело насыпи глубиной не более трёх метров от основания рельсошпальной решетки.

Данное предположение соотносится с результатами исследования, представленными в работе [130], в котором рассматривается применение распределенных датчиков вибрации для решения задач диагностирования перемещений железнодорожного пути (рис. 5.5).

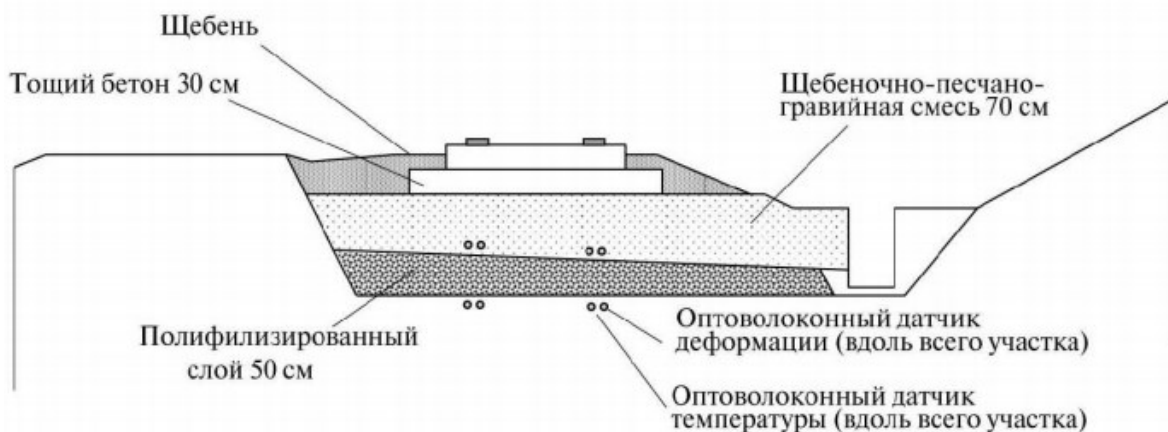


Рисунок 5.5 – Пример расположения сенсоров для задачи диагностики железнодорожного пути [130]

5.2 Разработка структурно-функциональной схемы устройства управления АПС на основе параметров движения поезда

Данный раздел посвящен вопросам разработки устройства управления переездной сигнализацией на основе параметров движения поезда, измеряемых с помощью распределенного оптического датчика, расположенного на участке приближения к переезду [188].

При этом для обеспечения условий надежности измерений в составе аппаратуры устройства управления АПС включен дополнительный измерительный тракт волоконно-оптического датчика, расположенный на участке приближения к переезду с другой стороны железнодорожного пути [189].

На рисунке 5.6. представлена схема устройства управления системой автоматической переездной сигнализации.

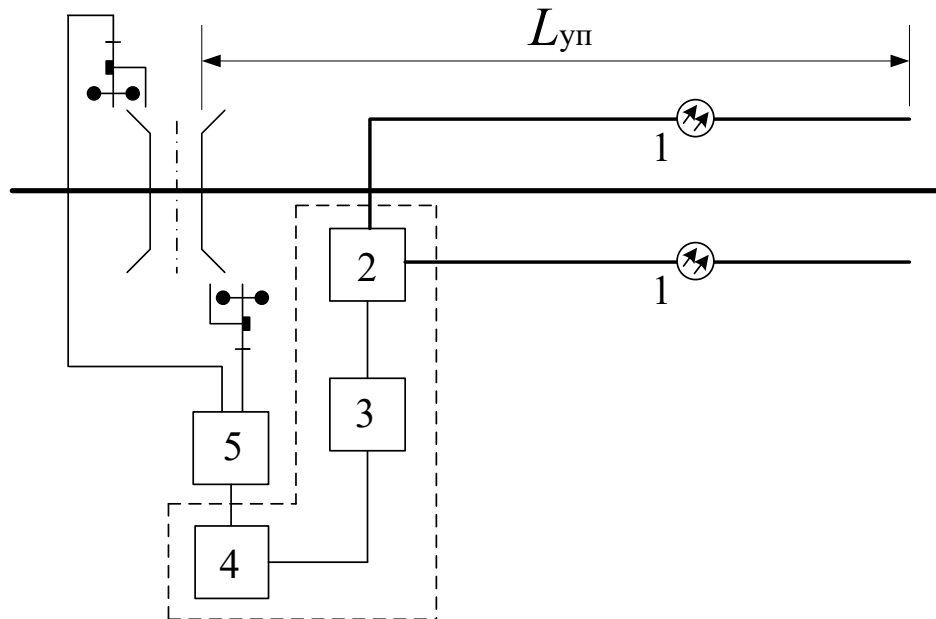


Рисунок 5.6 – Структурно-функциональная схема устройства управления системой автоматической переездной сигнализации

Структурно-функциональная схема устройства состоит из следующих структурных элементов (рис. 5.6): 1 – распределенный волоконно-оптический датчик; 2 – модуль опроса и обработки сигнала распределённого датчика; 3 – блок контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией; 4 – устройства сопряжения; 5 – устройства автоматической переездной сигнализации.

Устройство управления системой автоматической переездной сигнализации содержит два распределенных волоконно-оптических датчика, каждый из которых выполнен в виде заключенного в оболочку одномодового оптического световода. Волоконно-оптические датчики расположены в призме земляного полотна, вдоль контролируемых участков приближения к железнодорожному переезду $L_{уп}$, причем для возможности организации двух измерительных трактов один датчик расположен с одной стороны железнодорожного пути, а второй датчик – с другой стороны железнодорожного пути. Выходы распределенных волоконно-оптических датчиков 1 через модуль опроса 2 соединены с входом

блока контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией 3. Модуль опроса (рис. 5.7) содержит источник последовательных коротких импульсов и приемник рассеянного сигнала и предназначен для приема информации от распределенного волоконно-оптического датчика 1.

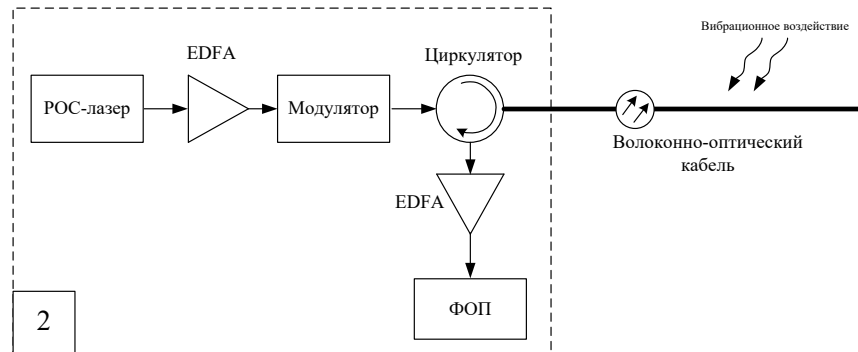


Рисунок 5.7 – Модуль опроса и обработки сигнала распределенного датчика

Устройства автоматической переездной сигнализации 5, в том числе переездные светофоры, шлагбаумы, УЗП подключены к выходу устройства сопряжения 4, вход которого соединен с выходом блока контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией 3. Устройство сопряжения 4 предназначено для управления исполнительными реле устройств переездной сигнализации 5 по командам, формируемым блоком контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией 3, и передачи информации о состоянии объектов управления.

В модуле опроса и обработки сигнала осуществляется параллельное вычисление в двух идентичных каналах (рис. 5.8) и сравнение полученных данных сигнала распределенного оптического датчика. При успешном результате сравнения данные поступают в блок контроля параметров движения и управления переездной сигнализацией. В случае если обработанные данные рефлектограмм двух измерительных каналов отличаются, снимается питание с управляющих объектов, подключенных к блоку контроля и управления, а устройство управления АПС переводится в необратимое защитное состояние.

В состав блока контроля и управления входит вычислительная система, осуществляющая вычисление, хранение и прогнозирование параметров движения

движущегося по участку приближения к переезду подвижной единицы, и подачи управляющей команды на устройство сопряжения с объектами, к выходу которого подключено управляющее реле (реле У) и контакты реле контролируемых состояние устройств АПС. Указанные модули имеют «горячий» резерв: в активном комплекте осуществляются вычисления и управления объектами, в пассивном комплекте контролируется работоспособность активного комплекта. В случае неисправности активного комплекта пассивные модули автоматически переходят в активное состояние без нарушения работы устройства.

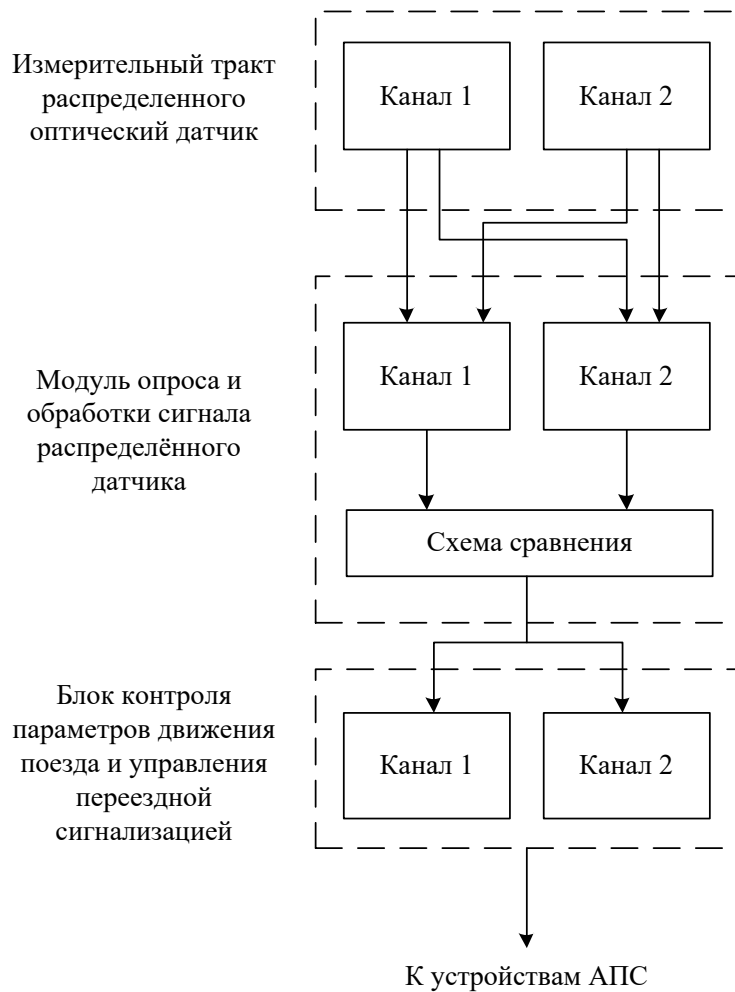


Рисунок 5.8 – Структурная схема устройства управления АПС

В основе функционирования устройства лежит принцип непрерывного определения скорости и ускорения движения поезда на участке приближения к переезду [190], благодаря чему достигается минимальное возможное (по условиям безопасности) значение длительности закрытого состояния переезда. При этом применяются методы регистрации и обработки оптического

интерференционного рассеянного сигнала, вызванного вибрационным возмущением чувствительного световода распределенного волоконно-оптического датчика (рис. 5.9).

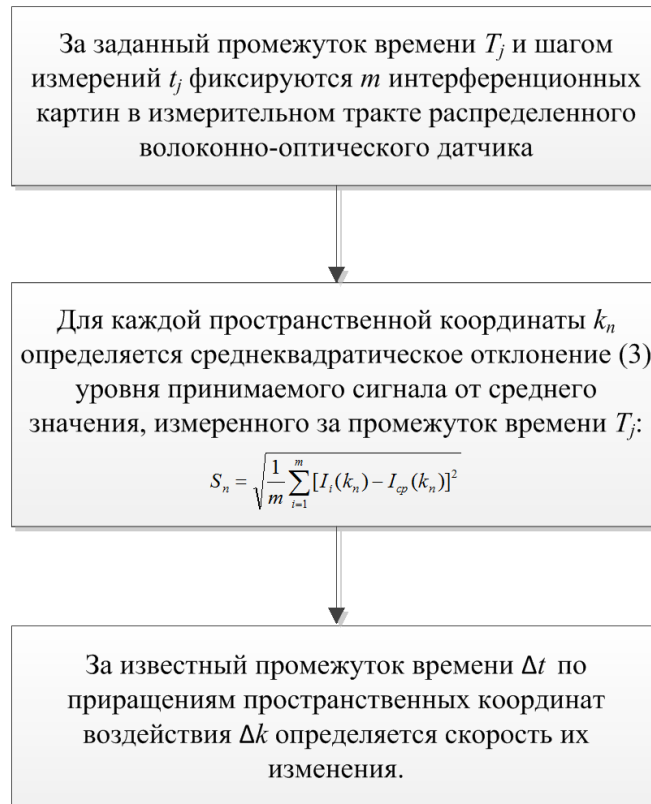


Рисунок 5.9 – Структурная схема процесса определения параметров движения поезда на участке приближения к переезду

При приближении поезда по участку извещения к переезду воздействия динамических нагрузок от подвижного состава на элементы верхнего строения пути локально влияют на изменение показателя преломления распределенного волоконно-оптического датчика. При этом на выходе распределенного волоконно-оптического датчика приемником регистрируется интерференционная картина: зависимость интенсивности рассеянного сигнала от пространственной координаты распределенного датчика.

В модуле опроса блоком приема и обработки сигнала за заданный промежуток времени T_j и шагом измерений t_j фиксируются m интерференционных картин каждого измерительного тракта.

Затем для каждой пространственной координаты k_n определяется среднеквадратическое отклонение уровня принимаемого сигнала от среднего значения, измеренного за промежуток времени T_j :

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [I_i(k_n) - I_{cp}(k_n)]^2}, \quad (5.2)$$

где S_n – оценка стандартного отклонения;

m – число измерений за заданный промежуток времени T_j ;

$I_i(k_n)$ – уровень принимаемого сигнала n -ой пространственной координаты для i -го измерения;

$I_{cp}(k_n)$ – среднее значение уровня принимаемого сигнала n -ой пространственной координаты.

По заданным максимальным пороговым значениям отклонения S_n определяются пространственные координаты воздействия. За известный промежуток времени Δt по приращениям пространственных координат воздействия Δk определяется скорость их изменения. Полученное значение скорости сравнивается со значением, вычисленным во втором измерительном тракте, и поступает в блок контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией.

Блок контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией сохраняет и анализирует информацию заданного числа фиксируемых подряд значений, а затем формирует данные о параметрах приближающегося к переезду подвижного состава в режиме реального времени. На основе полученных данных формируются команды управления устройствами автоматической переездной сигнализации согласно следующей логике работы системы:

1. В системе управления АПС заданы начальные параметры для расчета предельной длины контролируемого участка перед переездом L_0 :

$$L_0 = \frac{a_{\max} \cdot (t_{изв}^p)^2}{2} + V_{\max} \cdot t_{изв}^p, \quad (5.3)$$

где V_{\max} – максимальная установленная скорость движения поездов на участке;
 a_{\max} – максимально возможное изменение ускорения подвижного состава на участке;
 $t_{\text{изв}}^p$ – расчетная величина времени подачи извещения на переезд.

2. При вступлении поезда на контролируемый участок за один цикл измерения определяется прогнозное значение скорости ($\hat{V}_{\text{тек}}$) и ускорения ($\hat{a}_{\text{тек}}$) с помощью алгоритма фильтрации Калмана, и вычисляется прогнозное значение длины участка извещения ($\hat{L}_{\text{изв}}$):

$$\hat{L}_{\text{изв}} = \frac{\hat{a}_{\text{тек}} \cdot (t_{\text{изв}}^p)^2}{2} + \hat{V}_{\text{тек}} \cdot t_{\text{изв}}^p. \quad (5.4)$$

3. На следующем этапе контролируется положение головы поезда и расстояние до переезда с учетом длины прогнозного участка извещения. В случае достижения головой поезда начала прогнозного участка извещения формируется команда управления устройствами АПС на закрытие переезда.

Вместе с тем представляется возможным оценивать корректность расчетов прогнозного участка извещения на основе сравнения фактического пройденного расстояния поездом за текущий цикл измерения со спрогнозированным расстоянием, вычисленным на основе прогнозных параметров движения поезда на предыдущем цикле измерения.

Зависимость длины контролируемого участка и прогнозного участка извещения от переменных скорости и ускорения поезда можно представить в виде плоскости в трехмерном пространстве при заданном значении времени извещения (рис. 5.10)

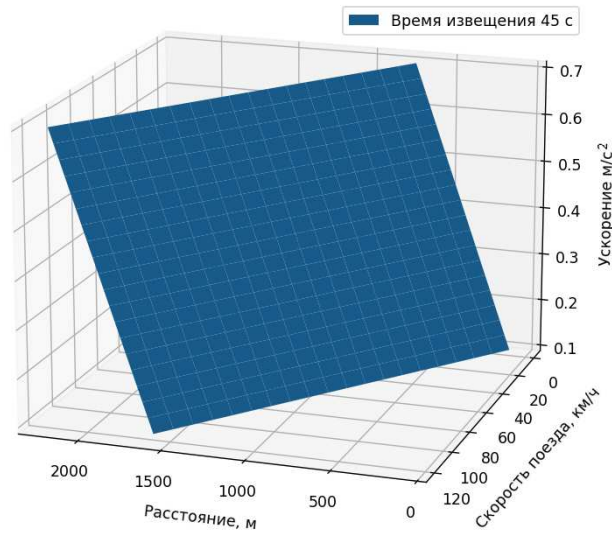


Рисунок 5.10 – Оценка длины контролируемого участка и участка извещения к поезду в зависимости от скорости и ускорения поезда при заданном времени извещения 45 сек.

Основные технические и эксплуатационные характеристики подвижных составов, в частности максимальная скорость и ускорение при эксплуатации, установлены техническими требованиями [191, 192, 193]. На основе эксплуатационных требований и максимальных установленных на участке характеристик движения поездов определяется критическая длина участка извещения к поезду, исходя из условий минимального времени разгона поезда с учетом максимального постоянного пускового ускорения. Множество достижимых значений длин участка извещения при заданном времени извещения 45 секунд можно представить графически в виде некоторой области (рис. 5.11).

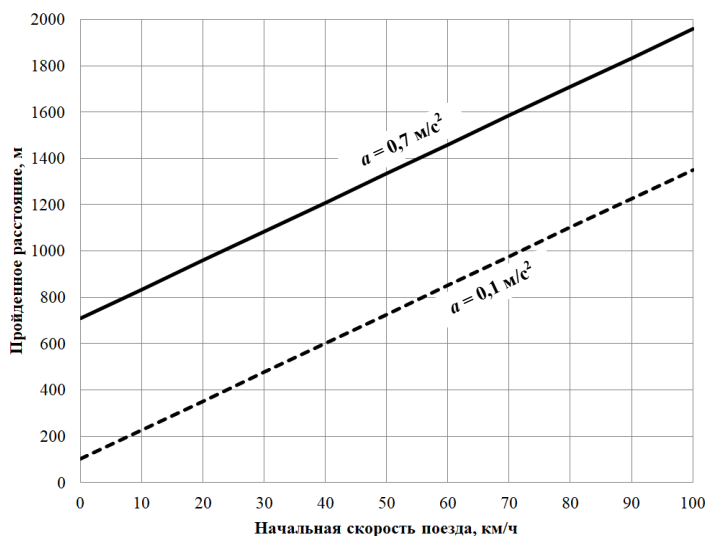


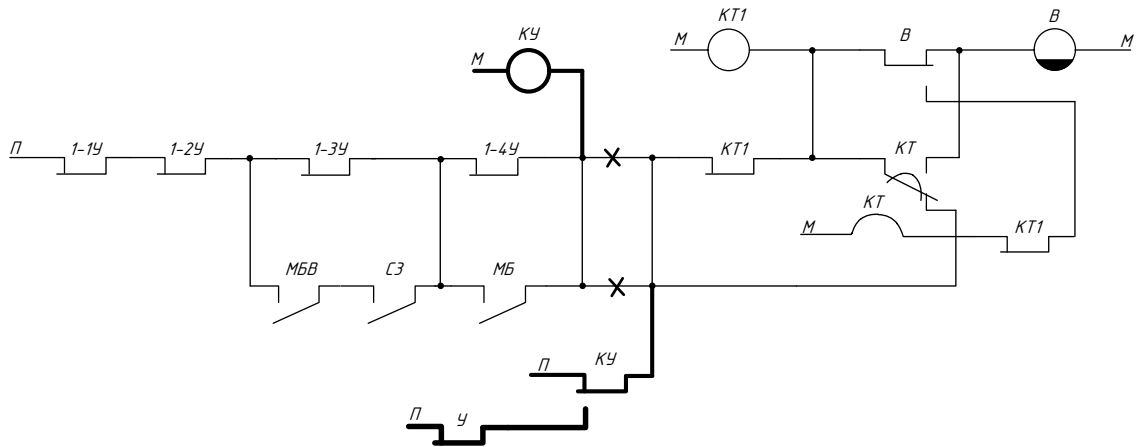
Рисунок 5.11 – Определение минимальной допустимой длины участка извещения к поезду

Нижняя граница заштрихованной области на графике рисунка определяет длины участка извещения при ускорении равном $a = 0,1 \text{ м/с}^2$. Верхняя граница заштрихованной области определяет длину участка извещения, в случае, если на исследуемом участке обращаются электропоезда с возможной величиной ускорения $0,7 \text{ м/с}^2$. Так, в случае вынужденной остановки поезда на участке приближения к переезду ($V = 0 \text{ км/ч}$) устройства АПС могут находиться в открытом состоянии, если поезд совершил остановку на расстоянии, не превышающую длину участка следования поездом с максимальным пусковым ускорением за промежуток времени подачи извещения на переезд. В данном случае минимальная допустимая длина участка извещения при заданном значении ускорения $a_{\max} = 0,7 \text{ м/с}^2$ составляет $L_{\text{изв}}^{\min} = 709 \text{ м}$. Присутствие подвижного состава на расстоянии от пересечения с автодорогой менее чем $L_{\text{изв}}^{\min}$ переводит устройства АПС в принудительное закрытое состояние, не зависящее от параметров движения поезда.

Нарушение указанного требования приводит к нарушению условий проезда автотранспортных средств, поскольку время следования поезда от места остановки до пересечения с автодорогой может быть меньше времени проезда автотранспортного средства через переезд.

Управление устройствами автоматической переездной сигнализации осуществляется с помощью устройства сопряжения. Устройство сопряжения также обеспечивает формирование и передачу информации о состоянии устройств переезда в блок контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией.

Устройство может применяться как на существующих, так и на вновь сооружаемых перегонных и станционных переездах, находящихся на железнодорожных путях общего и необщего пользования. Пример изменений, вносимых в существующую релейную схему включения извещения на переезд, основанную на типовых материалах для проектирования переездной сигнализации на перегонах [194], при модернизации устройств управления АПС приведена на рисунке 5.12.



* Утолщённой линией показаны вносимые изменения в существующую схему управления устройствами АПС

Рисунок 5.12 – Вносимые изменения в существующую релейную схему управления устройствами АПС

Вновь добавляемые реле в схему включающего реле:

- реле У – управляющее реле блока контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией; Включенное состояние реле У поддерживается системой управления АПС на основе измеряемой распределенными волоконно-оптическими датчиками информации о параметрах движения поезда на участке приближения к переезду;
- реле КУ – управляющее реле контроля занятости участков приближения к переезду; Выступает в качестве общего повторителя реле контроля свободности участков приближения и блокирующих реле МБВ, МБ.

При отсутствии поезда на участке приближения к переезду реле 1-1У, 1-2У, 1-3У, 1-4У находятся под током и обеспечивают включенное состояние реле КУ. Через контакты включенного реле КУ находятся под током реле КТ1 и В – переезд открыт.

При вступлении поезда на участок приближения обрывается цепь питания реле 1-1У, что приводит к выключению реле КУ. Однако, если фактическое расстояние между приближающимся поездом и началом пересечения с автодорогой больше длины прогнозного участка извещения ($L_{\text{факт}} > \hat{L}_{\text{изв}}$), управляющее реле У будет поддерживаться во включенном состоянии блоком контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией.

Таким образом, обеспечивается включённое состояние реле КТ1 и В и, следовательно, открытое состояние переезда.

Когда фактическое расстояние между приближающимся поездом и началом пересечения с автодорогой равно длине прогнозного участка извещения ($L_{\text{факт}} = \hat{L}_{\text{изв}}$), рассчитанного по текущим параметрам движения поезда, блоком контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией прекращается импульсная работа устройств сопряжения. Это приводит к выключению управляющего реле У. Kontakтами реле У выключаются реле В и КТ, и устройства АПС переходят в закрытое состояние.

Применение в схеме управления АПС нормально-включенного управляющего реле У дополнительно обеспечивает защиту, в случае отказа элементов блока контроля параметров движения поезда и управления переездной сигнализацией и зависания процессоров модуля опроса и обработки сигнала от распределенного датчика. При указанных условиях не обеспечивается импульсное питание управляющего реле, что приводит к его выключению, и система управления АПС деградирует до уровня существующей.

5.3 Выводы по главе

1. Сформулированы ограничения, связанные с показателями безопасности функционирования и надежности систем управления АПС на основе информации о параметрах движения поезда. При этом сокращение времени длительности закрытого состояния переезда возможно только при условии, что интенсивность отказов устройств управления АПС должна быть меньше 10^{-5} 1/ч, а интенсивность опасных отказов систем не должна превышать значения 10^{-9} 1/ч. На основе указанных ограничений предложена концепция безопасности предлагаемого устройства управления переездной сигнализацией.

2. Предложен способ привязки точек распределенного оптического датчика к ординате пути на основе характерных изменений сигнала рефлектометра. Установка в оптическую линию брэгговских решеток, а также кольцевая укладка кабеля в местах опорных геодезических пунктов участка железнодорожного пути (пикетные столбы, светофоры и пр.) позволяет определять и корректировать местоположение движущегося поезда по контролируемому участку.

3. Рассмотрен вопрос расположения оптического датчика в области нижнего строения железнодорожного пути. Выявлено, что наибольшее значение деформации нижнего строения пути при движении подвижного состава наблюдается под рельсошпальной решеткой по оси колеи. Поэтому, целесообразно при организации участков, контролируемых распределенными оптическими датчиками, располагать оптические сенсоры в тело насыпи глубиной не более трёх метров от основания рельсошпальной решетки.

4. Предложена структурно-функциональная схема устройства управления АПС на основе информации о параметрах движения поезда на участке приближения к переезду. Измерение параметров осуществляется с помощью оптического распределенного датчика, укладываемого на протяжении контролируемого участка. Технический результат предлагаемого устройства заключается в сокращении длительности закрытого состояния переезда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе изложены новые научно-обоснованные технико-технологические и методические решения, в области совершенствования систем управления автоматической переездной сигнализацией, имеющие существенное значение для развития страны. Решение поставленных в работе задач позволяет повысить эффективность функционирования железнодорожного переезда и принять меры по обеспечению безопасности перевозочного процесса в условиях высокой интенсивности движения поездов с учетом экономической целесообразности.

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

1. На основе анализа существующих подходов к расчету параметров работы устройств переездной сигнализации определена необходимость в исследовании функционирования железнодорожного переезда. Показано, что на сегодняшний день системы автоматической переездной сигнализации на сети железных дорог не позволяют обеспечить минимальных значений временных зависимостей при подаче извещения на переезд.

2. Разработана математическая модель работы железнодорожного переезда, основанная на имитационном моделировании. Модель позволяет определить время пребывания переезда в закрытом состоянии на основе данных о размерах и параметрах движения поездов на исследуемом участке. Научно обосновано, что при управлении устройствами АПС на основе параметров движения поезда достигается сокращение длительности закрытого состояния переезда.

3. Разработанная стохастическая модель функционирования железнодорожного переезда, реализованная в виде сети Петри, позволяет оценить безопасность движения поездов на конкретном переезде. Преимущество предлагаемого подхода в возможности исследования вероятности возникновения

опасного состояния движения поездов на переезде в зависимости от характеристик транспортных потоков и параметров работы АПС.

4. Проанализирован вопрос применения сенсорного волоконно-оптического кабеля на участке приближения к переезду, произведено обоснование выбора системы ф-OTDR фазочувствительного рефлектометра в условиях железнодорожного транспорта. С целью решения задачи определения местоположения, скорости и длины движущегося поезда на участке приближения к переезду предложены методы математической обработки сигнала фазочувствительного рефлектометра распределенного оптического датчика.

5. Разработано устройство управления системой АПС, согласно которому параметры движения поезда на участке приближения к переезду определяются на основе регистрации сигналов распределенного оптического датчика, укладываемого на протяжении контролируемого участка. Подобные технические решения позволяют организовать «плавающий» участок приближения к месту пересечения с автомобильной дорогой и сократить время пребывания переезда в закрытом состоянии. При этом время подачи извещения на переезд рассчитывается, исходя из текущих измеренных параметров движения поезда.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования включают в себя такие аспекты, как:

1. Разработка имитационной модели функционирования станционного железнодорожного переезда с целью определения направления совершенствования принципов управления системой АПС.

2. Оценка точности определения характеристик движения поезда на основе сигнала от распределенного оптического датчика, расположенного на участке приближения к переезду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ворона, А. А. Тенденции и перспективы грузооборота железнодорожного транспорта в России / А. А. Ворона // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. – 2020. – № 3(92). – С. 93-99.
2. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года : «Белая книга» : одобр. Науч.- техн. советом ОАО «РЖД» 2018 г. – Москва, 2015. – 128 с.
3. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года : «Белая книга» : одобр. Науч.- техн. советом ОАО «РЖД» 2015 г. – Москва, 2015. – 63 с.
4. Агафонов Д. В. Анализ целесообразности отделения железнодорожной инфраструктуры высокоскоростных магистралей в Российской Федерации // Наукоедение. 2017. Т. 9. № 1 (38). eISSN 2223-5167.
5. 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. – № 1 (7). – С. 7-20.
6. Галинуров, Р. З. Системы управления движением поездов в контексте высокоскоростного сообщения / Ю. В. Могильников, К. В. Гундырев, Р. З. Галинуров // Транспорт Урала. – 2017. – № 3 (54). – С. 35-40.
7. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 747 с.
8. Тимухина Е. Н., Кашеева Н. В., Колокольников В. С., Кошечев А. А. Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Вестник

Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2 (49), 26-33.

9. Свод правил. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования (утверждены приказом Минтранса России № 205 от 21.07.2015) – М.: Минтранс России, 2015. – 176 с.

10. De Gruyter, C., & Currie, G. (2016). Rail-road crossing impacts: an international synthesis. *Transport Reviews*, 36(6), 793–815. doi:10.1080/01441647.2016.1188429.

11. Watson, Inara & Ali, Amer & Bayyati, Amer. (2021). Factors Affecting Efficiency of Railways in Terms of Safety at Railway Level Crossings. *International Journal of Transport Development and Integration*. 5. 190-207. 10.2495/TDI-V5-N2-190-207.

12. Ефанов, Д.В. Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах / Д.В. Ефанов, Г.В. Осадчий, Д.Г. Плотников, В.В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – Т. 4. – С. 167–194.

13. Герус, В. Л. Повышение безопасности на железнодорожных переездах на основе совершенствования управления автоматической переездной сигнализацией : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.08 / Герус Владимир Леонидович; [Место защиты: Ур. гос. ун-т путей сообщ.]. – Самара, 2018. - 201 с.

14. Птушкина, Л. В. Совершенствование системы защиты от наездов подвижного состава на инфраструктуре железнодорожного транспорта : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.26.01 / Птушкина Любовь Викторовна; [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. – Москва, 2017. – 24 с.

15. Ганичев, А. И. Обеспечение безопасности движения на нерегулируемых железнодорожных переездах в системе "машинист-локомотив-окружающая среда" : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.07, 05.22.01 /

Самарский ин-т инж. железнодорожного транспорта. – Ростов-на-Дону, 2001. – 20 с.

16. Чех, Н. П. Устройство заграждения переезда / Н. П. Чех, В. Ф. Скубак, О. И. Цысь, В. А. Лавров // Путь и путевое хозяйство. – 1998. – № 1. – С. 28-29.

17. Минаков, Д. Е. Методы построения и технической эксплуатации электромеханических устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Минаков Денис Евгеньевич. – М., 2015. – 188 с.

18. Годяев, А. И. Методологические основы и принципы построения систем поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности управления движением на железнодорожном транспорте : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.22.08 / Годяев Александр Иванович.. – Москва, 2006. - 48 с.

19. Тарадин, Н. А. Методы оценки безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.08 / Тарадин Николай Александрович; [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. – Москва, 2010. - 23 с.

20. Гатауллин, С. Т. Экономическая оценка и пути снижения потерь на железнодорожных переездах : автореферат дис. ... кандидата экономических наук : 08.00.05, 08.00.13 / Гатауллин Сергей Тимурович; [Место защиты: Гос. ун-т упр.]. – Москва, 2009. - 20 с.

21. Хашев, А.И. Технология расчета потерь на железнодорожных переездах / А.И. Хашев // Вестник РГУПС. – 2020. – № 1. – С. 137–144.

22. Мохонько, В. П. Устройство контроля координаты и скорости поезда системы управления переездной сигнализацией : дис. ... кандидата технических наук : 05.13.05. – Самара, 2002. – 188 с.

23. Моисеев, Е. Г. Самонастраивающееся устройство контроля состояний рельсовых линий для систем управления переездной сигнализацией : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.05 / Моисеев Евгений Геннадьевич; [Место защиты: Уфим. гос. авиац.-техн. ун-т]. – Уфа, 2011. – 16 с.

24. Сисин, В. А. Рельсовые цепи с импульсными методами преобразования информации для систем автоматической переездной сигнализации : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.08 / Сисин Валерий Александрович; [Место защиты: Ур. гос. ун-т путей сообщ.]. – Екатеринбург, 2012. – 18 с.

25. Тарасов, Е. М. Принцип инвариантности в системах контроля состояний рельсовых линий [Текст] : монография / Е. М. Тарасов – М.: ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2016. – 212 с.

26. Трунаев, А. М. Совершенствование методов и средств формирования извещения в системах автоматического управления процессом функционирования железнодорожных переездов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : специальность 05.13.06 / Трунаев Андрей Михайлович. - Донецк, 2020. - 20 с.

27. Тильк, И. Г. Исследование и разработка комплекса технических средств, основанных на применении электронных систем счета осей (КТС ЭССО) : дисс. ... кандидата технических наук : 05.22.08 / Тильк Игорь Германович. – Екатеринбург, 2005. - 164 с.

28. 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.

29. Патент РФ № 2013153989/11, 04.12.2013. Устройство управления переездной сигнализацией // Патент России № 2544285, 2015. Бюл. № 8. / Гнитько Р.В., Курганский А.А., Тильк И.Г., Ляной В.В.

30. Щиголев, С. А. Новые решения для повышения безопасности на переездах / С. А. Щиголев // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 4. – С. 29-32.

31. Никитин, А. Б. Обеспечение безопасности на станционных переездах при организации высокоскоростного движения на действующих линиях / А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 2 (47). – С. 206-214.

32. Болтаев, С. Т. Методы и алгоритмы автоматизации управления на станциях железных дорог Республики Узбекистан при высокоскоростном движении : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.08 / Болтаев Суннатилло Гуймуродович; [Место защиты: Петерб. гос. ун-т путей сообщ.]. – Санкт-Петербург, 2018. - 16 с.

33. ГОСТ 33893-2016 Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля : Межгосударственный стандарт. – М. : Стандартинформ, 2017. – 16 с.

34. Об утверждении Условий эксплуатации железнодорожных переездов : Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 31.07.2015 N 237 (ред. от 06.08.2019) . – М.: Министерство юстиций Российской Федерации, 2015. – 46 с.

35. УЖДА-12-45 ТМП. Типовые материалы по проектированию. Устройства контроля состояния свободности станционных участков пути методом счета осей подвижного состава КССП «Урал». – ЗАО "ВНТЦ "УРАЛЖЕЛДОР АВТОМАТИЗАЦИЯ", 2013. – 103 с.

36. 421413-01-ТМП. Типовые материалы по проектированию. Устройства контроля свободности путевых участков методом счета осей с использованием аппаратуры ЭССО в системах железнодорожной автоматики и телемеханики. – НПЦ «ПРОМЭЛЕКТРОНИКА», 2010. – 46 с.

37. Бушуев, С. В. Средства контроля свободности участков пути и изломы рельсов / С. В. Бушуев, А.Н. Попов, М.Л. Попова // Транспорт Урала. – 2020. – № 3(66). – С. 43-50.

38. Бушуев, С. В. Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути / С. В. Бушуев, А.Н. Попов, М.Л. Попова // Автоматика на транспорте. – 2019. – № 2. – С. 202-220.

39. Системы безопасности на железнодорожных переездах: учебно-методическое пособие / В.М. Пономарев, В.И. Жуков, А.В. Волков, А.С. Кочетов, Л.В. Гришина. – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 133 с.

40. Горбунов, А. Е. Устройство определения координаты и скорости отцепов для систем управления технологическими процессами на транспорте : авторев. дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Горбунов Алексей Евгеньевич. – Самара, 2008. – 18 с.

41. Хохлов, А. А. Технические средства обеспечения безопасности движения на железных дорогах [Текст] : учебное пособие для студентов вузов ж.-д. трансп. / А. А. Хохлов, В. И. Жуков, 2009. - 551 с.

42. Бобровский, В. И. Исследования и оценка влияния скорости роспуска составов на показатели работы сортировочного комплекса / В. И. Бобровский, А.И. Колесник // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2011. – № 2. – С. 10-16.

43. Бобровский, В. И. Исследование влияния длины измерительного участка на скорость роспуска составов / В. И. Бобровский // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках : Межвуз. сб. научных трудов. – Днепропетровск : ДИИТ, 1986. – С. 115.

44. Фонарев, Н. М. Автоматизация процесса расформирования составов на сортировочных горках [Текст] / Н. М. Фонарев, 1971. – 271 с.

45. Модин, Н. К. Безопасность функционирования горочных устройств [Текст] / Н. К. Модин, 1994. - 173 с.

46. Никитин, А. Б. Управление стрелочными электроприводами в компьютерных системах горочной централизации / А. Б. Никитин, А.Н. Ковкин // Автоматика на транспорте. – 2015. – № 1. – С. 51-62.

47. ГОСТ Р 33892-2016 Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на сортировочных станциях. Требования безопасности и методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.

48. Соколов, Ю.И. Экономика качества транспортного обслуживания грузовладельцев: монография / Ю.И. Соколов. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 184 с.

49. Демьянов, В. В. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах / В. В. Демьянов, О. Б. Имарова, М. Э. Скоробогатов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 4 (135). – С. 215-230.

50. Тарасов, А.В. О безопасности движения на неохраняемых переездах / А.В. Тарасов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 1 (38). – С. 33-40.

51. Widyastuti, H & Utami, A & Dzulfiqar, Z. (2019). Model of queuing in the railway level crossing (case study: Imam Bonjol railway level crossing in Blitar). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 650. 012053. 10.1088/1757-899X/650/1/012053.

52. Казаков, А. А. Принципы построения систем управления заградительными устройствами на переездах / А. А. Казаков, В. И. Белов, М. Л. Цыбулевский // Совершенствование автоматизации управления движением поездов : Межвузовский сборник. – М., 1981. – С. 41-51.

53. Тарасов, Е. М. Повышение пропускной способности железнодорожных переездов самонастраиваемым алгоритмом управления АПС / Е. М. Тарасов, Г. М. Третьяков, А. А. Булатов, А. Е. Тарасова // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 2. – С. 63-71.

54. Тарасов, Е.М. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации / Е.М. Тарасов, Д.В. Железнов, В.Л. Герус // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 6(54). – С. 58-61.

55. Попов, А. Н. Оценка вероятности аварийной ситуации при вынужденной остановке автомобиля на переезде / А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев // Автоматика на транспорте. – 2021. – № 1 (7). – С. 21-38.

56. Попов, А. Н. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом / А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). – С. 39-42.

57. Бушуев, С.В. Автоматическое управление закрытием переезда по характеристикам приближающегося поезда / С.В. Бушуев, А.Н. Попов, С.Ю. Гришаев // Транспорт Урала. – 2021. – № 1 (68). – С. 3-7.

58. Гришаев, С.Ю. Время закрытия переезда при различных способах формирования участков извещения / А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев // Транспорт Урала. – 2020. – № 4 (67). – С. 29-33.

59. Никитин, А. Б. Обеспечение безопасности на станционных переездах при организации высокоскоростного движения на действующих линиях / А. Б. Никитин, С.Т. Болтаев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 2 (47). – С. 206-214.

60. Козлов, П. А. Проблема организации единой транспортной системы / П. А. Козлов, Н.А. Тушин, В.С. Колокольников // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – № 3. – С. 748-755.

61. Ляной, В. В. Индуктивные датчики регистрации прохода колеса железнодорожной подвижной единицы. Проблемы и перспективы использования / В. В. Ляной // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 1. — С. 37-42.

62. Леушин, В. Б. Особенности структур рельсовых цепей автоблокировки: учебное пособие / В. Б. Леушин. – Самара : СамГУПС, 2009. – 163 с.

63. Тарасов, Е. М. Разработка устройства вычисления скорости подвижной единицы на рельсовом пути / Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова // Вестник СамГУПС. – 2019. – № 1. – С. 123-129.

64. Марюхненко, В. С. Особенности применения радиолокационных измерителей скорости подвижных объектов железнодорожного транспорта / В. С. Марюхненко, М. А. Гурулёва // Вестник ИрГТУ. – 2019. – № 1 (108). – С. 129-142.

65. Григорин-Рябов, В. В. Радиотехнические железнодорожные устройства: учебное пособие / В. В. Григорин-Рябов, А. М. Вериги, О. И. Шелухин, В. И. Шелухин. – М. : Транспорт, 1986. – 161 с

66. Орлов, А. В. Совершенствование методов измерения параметров движения поездов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Орлов Александр Валерьевич. – М., 2006. – 174 с.

67. Попов, П. А. Совершенствование методов и алгоритмов управления в системах интервального регулирования движения поездов с использованием радиоканала : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Попов Павел Александрович. – Санкт-Петербурга, 2014. – 173 с.

68. Марюхненко, В. С. Структурный синтез навигационного обеспечения информационных систем управления подвижными объектами : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Марюхненко Виктор Сергеевич. - Иркутск, 2005. - 18 с.

69. Алешечкин, А. М. Определение угловой ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем : монография / А. М. Алешечкин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. – 176 с.

70. Лёвин, Б. А. Теория адаптивных систем навигации и управления железнодорожного транспорта на основе глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и навигационных функций: монография / Б. А. Лёвин, С. И. Матвеев, И. Н. Розенберг. – М.: ВИНТИ РАН, 2014. – 109 с.

71. Елисеев, В. А.. Направления развития спутникового мониторинга железнодорожного транспорта. / В. А. Елисеев // Интерактивная наука. – 2016. – № 8. – С. 62-68. DOI: 10.21661/r-113467.

72. Ивницкий, В. А. Моделирование информационных систем железнодорожного транспорта : Учебное пособие / В. А. Ивницкий. – М.: ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2015. – 276 с.

73. Функциональное моделирование работы железнодорожных станций [Текст]: монография / В. И. Бобровский, Д.Н. Козаченко, Р.В. Вернигора, В.В. Малашкин; Днепрпетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепрпетровск, 2015. – 269 с.

74. Боев, В. Д. Моделирование в среде Anylogic : учебное пособие для вузов / В. Д. Боев. – М. : Юрайт, 2020. – 298 с.
75. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
76. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов. – М. : Юрайт, 2017. – 389 с.
77. Zar, Jerrold H. (1998). Biostatistical Analysis. New Jersey: Prentice Hall International, INC. p. 147. ISBN 978-0-13-082390-8.
78. Siegal, Sidney (1956). Nonparametric statistics for the behavioral sciences. McGraw-Hill. p. 121.
79. Carrese, S., Petrelli, M. & Renna, A., Safety at LCs in Italy: evidence from the Safer-LC Project. Transportation Research Procedia, 45, pp. 562–571, available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520302180>, 2020.
80. Kallberg, V., Safety audits at Finnish level crossings. The Open Transportation Journal, [online] 5(1), pp. 80–87, available at <https://opentransportationjournal.com/contents/volumes/V5/TOTJ-5-80/TOTJ-5-80.pdf>, 2011
81. И-276-00. Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. Расчет параметров работы переездной сигнализации. – М.: ГУП ГИПРОТРАНССИГНАЛСВЯЗЬ, 2000. – 33 с.
82. Назаров, А. А. Теория вероятностей и случайных процессов : учебное пособие / А. А. Назаров, А.Ф. Терпугов. – Томск : Изд-во НТЛ, 2010. – 204 с.
83. Assessment of Safety at Level Crossings in UNECE Member Countries and Other Selected Countries and Strategic Framework for Improving Safety at Level Crossings: ECE/TRANS/WP.1/2017/4 [Electronic resource] / Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee. Geneva, 2017. Mode of access: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf>.

84. Дзюба, Ю. В. Применение сетей Петри при управлении движением / Ю. В. Дзюба, А. А. Павловский // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – № 2. – С. 77-88.

85. Булавский, П. Е. моделирование и оценка времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью сетей петри / П. Е. Булавский, О. К. Вайсов // Автоматика на транспорте . – 2019. – № 4. – С. 478-492.

86. Павлов, Е. В. Методы повышения безопасности функционирования централизованных систем автоблокировки : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.08 / Павлов Евгений Владимирович. – Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. – Москва, 2005. – 24 с

87. Lijie, Chen & Hongjie, Liu & Weiqi, Wang. (2018). Using Colored Petri net for Level-Crossing safety analysis. 1-5. 10.1109/ICIRT.2018.8641674.

88. Vanit-Anunchai, Somsak. (2010). Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets. 6116. 137-151. 10.1007/978-3-642-13414-2_10.

89. Ghazel, Mohamed. (2017). A Control Scheme for Automatic Level Crossings under the ERTMS/ETCS Level 2/3 Operation. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. PP. 10.1109/TITS.2017.2657695.

90. Carnevali, Laura & Flammini, Francesco & Paolieri, Marco & Vicario, Enrico. (2015). Non-Markovian performability evaluation of ERTMS/ETCS level 3. 9272. 47-62. 10.1007/978-3-319-23267-6_4.

91. Королев, Ю. И. Методы и программные средства моделирования сложных динамических систем на основе темпоральной модификации раскрашенных сетей Петри: авторев. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Королев Юрий Ильич. – М., 2015. – 20 с.

92. Бестужева, И. И. Временные сети Петри. Классификация и сравнительный анализ / И. И. Бестужева, В. В. Руднев // Автомат. и телемех.. – 1990. – № 10. – С. 3-241.

93. Галинуров, Р. З. Исследование параметров работы переездной сигнализации на основе стохастического моделирования / Р. З. Галинуров, А. Н. Попов // Транспорт Урала. – 2022. – № 2 (73). – С. 42-49.

94. Jensen, K., Kristensen, L.M. & Wells, L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems. *Int J Softw Tools Technol Transfer* 9, 213–254 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10009-007-0038-x>

95. M. Paolieri, M. Biagi, L. Carnevali and E. Vicario, "The ORIS Tool: Quantitative Evaluation of Non-Markovian Systems," in *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 47, no. 6, pp. 1211-1225, 1 June 2021, doi: 10.1109/TSE.2019.2917202.

96. Dingle, Nicholas & Knottenbelt, William & Suto, Tamas. (2009). PIPE2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets. *SIGMETRICS Performance Evaluation Review*. 36. 34-39.

97. Королев, Ю. И. Методы и программные средства моделирования сложных динамических систем на основе темпоральной модификации раскрашенных сетей Петри: авторев. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Королев Юрий Ильич. – М., 2015. – 20 с.

98. Угоренко, Л. Ч. Методы анализа обобщенных временных стохастических сетей Петри / Л. Ч. Угоренко, А.В. Сисков // Системи обробки інформації. – 2004. – № 10 (38). – С. 211-223. ISSN 1681-7710.

99. Тарасюк, И.В. Стохастические сети Петри - формализм для моделирования и анализа производительности вычислительных процессов // Системная информатика. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – Вып. 9. – С. 135-194.

100. Иванов, Н. Н. Полумарковские процессы во временных стохастических сетях Петри / Н. Н. Иванов // Автомат. и телемех. – 1994. – № 3. – С. 117-127.

101. Марковские процессы принятия решений / Х. Майн, С. Осаки; Пер. с англ. В. В. Калашникова, В. С. Манусевича; Под ред. Н. П. Бусленко. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. – 176 с.

102. Biagi, Marco & Carnevali, Laura & Vicario, Enrico & Paolieri, Marco. (2017). An introduction to the ORIS tool. 9-11. 10.1145/3150928.315836
103. Hogg, R. V.; Craig, A. T. (1978). Introduction to Mathematical Statistics (4th ed.). New York: Macmillan. pp. Remark 3.3.1. ISBN 0023557109.
104. Степанов, К. В. Перспективы использования распределенных волоконнооптических датчиков на железнодорожном транспорте / К. В. Степанов, А.А. Жирнов, А.О. Чернуцкий, К.И. Кошелев, А.С. Лаптев, Е.Т. Нестеров, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 9. – С. 11-13.
105. Galinurov, R. Z. Distributed fiber-optic sensors for location monitoring of rolling stock / A. N. Popov, S. V. Bushuev, R. Z. Galinurov, A. B. Nikitin // AIP Conference Proceedings: Proceedings of the Scientific Conference on Railway Transport and Engineering. 2021. No. 2389. Pp. 070002-1–070002-8.
106. Бухарин, М. А. Позиционирование подвижного состава с использованием нейронных сетей / М. А. Бухарин, С.В. Прокопенко, К.В. Гуртовой, С.А. Скубченко, В.Н. Трещиков // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 9. – С. 8-10.
107. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, Т. Окамото, М. Оцу [и др.]; под. ред. Т. Окоси - пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
108. Бусурин, В. И. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
109. Гуляев, Ю. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение / Ю. В. Гуляев. – М. : Радио и связь, 1991. – 150 с.
110. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Э. Удд. // Москва: Техносфера, 2008 – 520 с.
111. Плотников, М. Ю. Волоконно-оптический гидрофон : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.01 / Плотников Михаил Юрьевич; [Место защиты: С.-Петербург. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики]. - Санкт-Петербург, 2014. - 23 с.

112. Петров, Ю. С. Методы создания измерительных преобразователей для распределенных волоконно-оптических измерительных систем : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.16 / Дальневост. гос. техн. ун-т. - Владивосток, 2006. - 22 с.

113. Пнев, А. Б. распределённые волоконно-оптические датчики регистрации вибрационных воздействий на основе слабоотражающих брэгговских решёток для мониторинга железнодорожного транспорта. / А. Б. Пнев, К.В. Степанов, А.А. Жирнов, А.О. Чернуцкий, Е.Т. Нестеров, В.Е. Карасик // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6 (158). – С. 28-29.

114. Wei, Chu-liang and Lai, Chun-cheung and Liu, Shun-yee and Chung, W.H. and Ho, Tin Kin and Tam, Hwa-Yaw and Ho, S.L. and McCusker, A. and Kam, J. and Lee, K.Y. (2010) A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. IEEE Sensors Journal, 10(12). pp. 1905-1912.

115. Efanov, Dmitry & Osadchy, German & Khoroshev, Valerii. (2018). Testing of Optical Sensors in Measuring Systems on Railway Marshalling Yard. 1-6. 10.1109/EWDTS.2018.8524798.

116. Lai, C. & Kam, Jacob & Leung, David & Lee, Tony & Tam, Aiken & Ho, S.L. & Tam, Hwa & Liu, Shun-Yee. (2012). Development of a Fiber-Optic Sensing System for Train Vibration and Train Weight Measurements in Hong Kong. Journal of Sensors. 2012. 10.1155/2012/365165.

117. Wei, Chuliang & Xin, Qin & Chung, Wenghong & Liu, Shun-Yee & Tam, Hwa & Ho, S.L. (2012). Real-Time Train Wheel Condition Monitoring by Fiber Bragg Grating Sensors. IJDSN. 2012. 10.1155/2012/409048.

118. Прокопенко, С. А. Автоматизация процессов контроля и диагностики в системах железнодорожной автоматики и телемеханики на основе волноводно-оптических технологий : авторев. дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Прокопенко Сергей Анатольевич. – Ростов-на-Дону, 2009. – 20 с.

119. Nelson D. E., Kleiman D. A., Wecht K. W. Vibration induced modulation of fiberquide transmission // Appl. Phys. Lett. 1977. No. 2. Pp. 94–96.

120. Савин, Е. З. Воздействие электрического поля на волоконно-оптический кабель, подвешенного на опорах контактной сети электрифицированной железной дороги / Е. З. Савин, Ю. А. Мильков // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях : тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Хабаровск, 2017. – С. 131-136.

121. Савин, Е. З. Влияние электромагнитного поля электрифицированных железных дорог на поляризационные явления в волоконном световоде / Е. З. Савин // Вестник РГУПС. – 2006. – № 4. – С. 81–87.

122. Гиркин, И. В. Промышленный интернет вещей (IIoT) от компании Cisco как основа интегрированных операций для нефтегазовой отрасли / И. В. Гиркин, А. А. Гречин // Нефть. Газ. Новации. – 2016. – № 8. – С. 27-31.

123. Шнеерсон, М. Б. Распределенные акустические сейсмические системы при работах ВСП / М. Б. Шнеерсон // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2017. – № 1. – С. 23–25. ISSN 2076-6785.

124. Rosenberger M., Hall A. Distributed Acoustic Sensing as a base technology for railway applications // Signalling+Datacommunication. 2016. No. (108) 9. Pp. 73–84.

125. Определение мест коротких замыканий в тяговых сетях при помощи технологии DAS // Железные дороги мира. – 2017. – № 12. – С. 58-63.

126. Schubert M., Bauer E. Fiber Optic Sensing im Eisenbahnsektor // Signal+ Draht. 2015. No. (107) 9. Pp. 42–46.

127. Воронин, В. А. Оптоволоконная рефлектометрия в системах интервального регулирования движения поездов / В. А. Воронин, В.В. Воробьев, Е.В. Ермаков // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 4. – С. 55-57.

128. Горбуленко, В. В. Волоконно-оптическая система мониторинга "Дунай" / В. В. Горбуленко, А.В. Леонов, К.В. Марченко, В.Н.Трещиков // Фотон-экспресс. – 2014. – № 5 (117). – С. 12-15.

129. Бухарин, М. А. Технологии виброакустического мониторинга для нужд железнодорожного транспорта / М. А. Бухарин, К.В. Шишков // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 4. – С. 58-59.
130. Савин, А. В. Применение оптоволоконных технологий для диагностики безбаластного пути / А. В. Савин // Вестник РГУПС . – 2017. – № 2. – С. 91–97.
131. Галинуров, Р. З. 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.
132. Xiaoyi B., Liang C. Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors // Sensors. 2012. No. 12. Pp. 8601–8639.
133. Листвин, А. В. Рефлектометрия оптических волокон / А. В. Листвин, В. Н. Листвин. – М. : ЛЕСАРпт, 2005. – 208 с.
134. OFDR-Based Distributed Sensing and Fault Detection for Single- and Multi-Mode Avionics Fiber-Optics / R. G. Duncan, B. J. Soller, D. K. Gifford, et al. // Joint Conference on Aging Aircraft. Palm Springs, CA, USA, 2007. Pp. 16–19.
135. Yonas Muanenda, "Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry", Journal of Sensors, vol. 2018, Article ID 3897873, 16 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3897873>.
136. Muanenda Y. Review Article Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry // Hindawi. Journal of Sensors. 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/js/2018/3897873/> (дата обращения: 01.07.2018).
137. Timofeev A. V., Denisov V. M. The Rail Traffic Management with Usage of C-OTDR Monitoring Systems // ICCAR 2015 : 17th International Conference on Control, Automation and Robotics. Zurich, 2015. Pp. 1338–1341.
138. Shi Y., Feng H., Zeng Z. A long distance phase-sensitive optical time domain reflectometer with simple structure and high locating accuracy // Sensors. 2015. No. 9. Pp. 21957–21970.

139. Гудмен Дж. Статистическая оптика: Пер. С англ. – М.: Мир, 1988. – 528 с.
140. P.Healey, “Statistics of Rayleigh Backscatter From a Single-Mode Fiber,” IEEE Trans. Commun., vol. 35, no. 2, pp. 210–214, 1987.
141. Тонози, О. Модель волоконного фазочувствительного рефлектометра и ее сравнение с экспериментом / О. Тонози, С. Б. Аксенов, Е. В. Подивилов, С. А. Бабин // Квантовая электроника. – 2010. – № 10. – С. 887-892.
142. Алексеев, А. Э.. Волоконная интерферометрия рассеянного излучения и ее применение для регистрации акустических воздействий: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 01.04.03 / Алексеев Алексей Эдуардович; [Место защиты: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН].- Москва, 2013.- 282 с.
143. Жирнов, А. А. Фазочувствительный рефлектометр на основе перестраиваемого по частоте излучения твердотельного иттербий-эрбиевого лазера : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.07 / Жирнов Андрей Андреевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2019. - 16 с.
144. Алексеев, А. Э. Статистические свойства интенсивности частично поляризованного, обратнорассеянного одномодовым оптическим волокном излучения полупроводниковых лазерных источников / А. Э. Алексеев, Б.Г.Горшков, В.Т.Потапов // Квантовая электроника. – 2015. – № 8 (45). – С. 748–753.
145. Рассошенко, Ю. С. Проблема оценки вибрационных полей поверхностных волн Рэлея, создаваемых высокоскоростными железнодорожными линиями / Ю. С. Рассошенко, Н.И. Иванов, В.В. Крылов // Noise Theory and Practice. – 2018. – № 2 (4). – С. 21-29.
146. Коншин, Г.Г. Упругие деформации и вибрации земляного полотна; Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2010. -180с.
147. Смолин, Ю.П. Прочность железнодорожных насыпей, сложенных мелкозернистыми и пылеватыми песками, воспринимающими динамическое

воздействие от подвижного состава : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.06. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 272 с.

148. Ашпиз, Е. С. Железнодорожный путь : Учебник / Е. С. Ашпиз, А.И. Гасанов, Б.Э. Глюзберг и др.. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 544 с.

149. Востриков, К. В. К вопросу о границе санитарно-защитной зоны от вибрационного воздействия транспорта / К. В. Востриков, Ю.П. Смолин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 1. – С. 163-172.

150. 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.

151. Юлдашев, Ш. С. Распространение вибраций в грунтах, возникающих при движении железнодорожных поездов / Ш. С. Юлдашев, С.М. Саидов, М.Я. Набиев // Молодой ученый . – 2015. – № 11 (91). – С. 481-483.

152. Alekseev, A. E. Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance / A. E. Alekseev, B. G. Gorshkov , V. T. Potapov, M. A. Taranov, D. E. Simikin // Laser Physics. – 2020. – № 30. – С. 1-10.

153. Ali Masoudi. Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling / Ali Masoudi, Trevor P. Newson // Optics express. – 2017. – № 25. – С. 32021-32040.

154. Алексеев, А. Е. Статистика интенсивности обратно-рассеянного излучения полупроводникового лазера в одномодовом оптическом волокне / А. Е. Алексеев, Я. А. Тезадов, В. Т. Потапов // Письма в ЖТФ. – 2012. – № 2. – С. 74-81.

155. Gysel, P. Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers / P. Gysel, R. K. Staubli // Journal of Lightwave Technology. – 1990. – vol. 8, № 4 – P. 561-567.

156. Алексеев, А. Э. Статистические свойства обратнорассеянного излучения полупроводниковых лазеров с различной степенью когерентности / А.

Э. Алексеев, Я. А. Тезадов, В. Т. Потапов // Квантовая электроника. – 2012. – т. 42, № 1. – С. 76-81.

157. Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR / Y. Lu, T. Zhu, L. Chen, X. Bao // Journal of Lightwave Technology. 2010. No. 22. Pp. 3243–3249.

158. Горшков, Б. Г. Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра / Б. Г. Горшков, В. М. Парамонов, А. С. Курков и др. // Квантовая электроника. – 2006. – № 10. С. 963–965. ISSN 0368-7147.

159. Distributed fiber-optic intrusion sensor system / J. C. Juarez, E. W. Maier, K. N. Choi, H. F. Taylor // J. Lightwave Technol. 2005. No. 23(6).

160. Choi K. N., Juarez J. C., Taylor H. F. Distributed fiber optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters // AeroSense 2003. International Society for Optics and Photonics. 2003. Pp. 134–141.

161. Papp A., Wiesmey C. Train detection and tracking in optical time domain reflectometry (OTDR) signals // Lecture Notes in Computer Science. 2016. No. 9796. Pp. 320–331.

162. Kong, H., Zhou, Q., Xie, W., Dong, Y., Ma, C., & Hu, W. (2014). Events Detection in OTDR data based on a method combining Correlation Matching with STFT. Asia Communications and Photonics Conference 2014. doi:10.1364/acpc.2014.ath3a.148.

163. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR / F. Peng, N. Duan, Y. J. Rao, J. Li // IEEE Photonics Technol. Lett. 2014. No. 26 (20). Pp. 2055–2057.

164. Qin Z., Chen L., Bao X. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor // IEEE Photonics Technol. Lett. 2012. No. 24 (7). Pp. 542–544.

165. Ильин, В. А. Математический анализ. Начальный курс / В. А. Ильин, В. А. Садовничий, Бл. Х. Сендов; под ред. А. Н. Тихонова, — 2-е изд., перераб., — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 662 с.

166. Сато Юкио. Обработка сигналов. Первое знакомство : книга / Сато Юкио. – М. : Додека XXI, 2002. – 176 с.

167. Иванов, Д.С. Алгоритм оценки параметров ориентации малого космического аппарата с использованием фильтра Калмана [Электронный ресурс] / Д.С. Иванов, С.О. Карпенко, М.Ю. Овчинников // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2009. – № 48. – Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-48>.

168. Манонина, И. В. Методика обработки данных измерений параметров линий связи с применением вейвлет-анализа к рефлектометрическим измерениям : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.12.13 / Манонина Ирина Владимировна; [Место защиты: Моск. техн. ун-т связи и информатики]. - Москва, 2016. - 26 с.

169. Бусурин, В. И. Ограничение точности измерения потерь излучения в одномодовых волокнах: «вмороженные» неоднородности коэффициента обратного рэлеевского рассеяния / В. И. Бусурин, Б. Г. Горшков, Г. Б. Горшков, М. Л. Гринштейн, М. А. Таранов // Квантовая электроника. – 2017. – №1(47) – С. 83 – 86.

170. Семин, А. В. Разработка и исследование рефлектометрических методов контроля волоконно-оптических направляющих систем связи в процессе их строительства и эксплуатации : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.12.13 / С.-Петербург. гос. ун-т телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича. – Санкт-Петербург, 2004. – 17 с.

171. Журавлев, И.А. Управление надежностью функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики по экономическому критерию / А.В. Горелик, И.А. Журавлев, П.А. Неваров // Экономика железных дорог. – 2011. – №3. – С.60 – 69.

172. Безродный, Б. Ф. Принципы управления надежностью систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Б.Ф. Безродный., А.В. Горелик, Д.В. Шалягин, П.А. Неваров //Автоматика, связь, информатика. – 2008. – №7. – С. 13 – 14.

173. ГОСТ 34012 - 2016. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Общие технические требования : Межгосударственный стандарт. – М. : Стандартинформ, 2017. – 50 с.

174. СТО РЖД 1.19.008-2009. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики сортировочных станций. Технические требования : Стандарт ОАО "РЖД" – М. : ОАО «РЖД», 2009. – 40 с.

175. ГОСТ Р МЭК 61508-1 — 2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2008. – 44 с.

176. Новиков, Е. В. Методы анализа надежности сложных технических систем с временной избыточностью инфраструктуры железнодорожного транспорта : авторев. дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Новиков Евгений Владимирович. – М., 2012. – 24 с.

177. Воронин, В. Г. Оптический рефлектометр : учебное пособие / В. Г. Воронин, О.Е. Наний, А.А. Кулик, А.Н. Туркин. – М. : МГУ им М.В. Ломоносова, 2007. – 18 с.

178. Пат. 2682523 Российская Федерация, СПК В61L 1/166, G01L 1/246. Оптическое устройство для контроля заполнения пути / Баяндурова А. А.; заявитель и патентообладатель АО "НИИАС". – № 2018122514; заявл. 21.06.2018; опубл. 19.03.2019, Бюл. № 8. – 9 с.

179. Шелемба, И. С. Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 01.04.05 / Шелемба Иван Сергеевич; [Место защиты: Ин-т автоматики и электрометрии СО РАН]. - Новосибирск, 2018. - 24 с.

180. Куликов, А. В. Волоконно-оптические акустические сенсоры на брэгговских решетках : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.01 / Куликов Андрей Владимирович; [Место защиты: С.-Петербург. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики]. – Санкт-Петербург, 2012.– 144 с.

181. Степанов, К. В. Волоконно-оптическая сенсорная система с повышенной акустической чувствительностью на основе фазочувствительного

рефлектометра : авторев. дисс. ... канд. тех наук : 05.11.07 / Степанов Константин Викторович . – М., 2021. – 17 с.

182. Колмогоров, О.В. Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением / О.В. Колмогоров, А.Н. Щипунов, О.В. Денисенко, С.С. Донченко, Д.В. Прохоров, С.Г. Буев, Е.В. Чемесова // Измерительная техника. – 2020. – № 1. – С. 30 – 34.

183. Колмогоров, О.В. Установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах / О.В. Колмогоров, А.В. Дейкун, Е.В. Чемесова. Установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах // Альманах современной метрологии. – 2020. – № 1(21). – С. 126 – 135.

184. V. Hou, “Update on Interim Results of Fiber Optic System Field Failure Analysis”, NFOEC Proceedings Vol. 1, p. 539-545, (1991); Rados, I., Sunaric, T., & Turalija, P. (n.d.). Suggestions for availability improvement of optical cables. ICCSC’02. 1st IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. Proceedings (IEEE Cat. No.02EX605). doi:10.1109/ocsc.2002.1029086.

185. Ситнов, Н. Ю. Исследование методов ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.12.13 / Ситнов Николай Юрьевич; [Место защиты: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики]. – Новосибирск, 2011. - 24 с.

186. Технологии строительства ВОЛП. Оптические кабели и волокна: Учебное пособие для вузов / В.А. Андреев, Р.В. Андреев, А.В. Бурдин, В. А. Бурдин, М. В. Дашков, Б. В. Попов, В.Б. Попов / под редакцией В.А. Андреева – Самара : СРТТЦ ПГУТИ, 2016. – 369с.

187. Ефанов, В. И. Проектирование, строительство и эксплуатация ВОЛС: учебное пособие / В. И. Ефанов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 102 с.

188. Галинуров, Р. З. Применение оптоволоконных технологий для контроля объектов железнодорожной инфраструктуры / Р. З. Галинуров, А. Н. Попов // Информационные технологии и когнитивная электросвязь : Материалы V Межвузовского научного семинара. – Екатеринбург: типография УрТИСИ СибГУТИ, 2019. – С. 103-105.

189. Пат. 2732685 Российская Федерация, МПК В61L 29/24 (2006.01). Устройство управления системой автоматической переездной сигнализации / Попов А. Н., Галинуров Р. З. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УрГУПС. – № 2019126243 ; опубл. 21.09.2020, Бюл. № 27.

190. Галинуров, Р. З. Измерение скорости подвижного состава с помощью распределенного волоконно-оптического датчика / Р. З. Галинуров, А. Н. Попов // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту». – Самара : СамГУПС, 2019. – № 1. – С. 314-318.

191. ГОСТ Р 55434-2013. Электропоезда. Общие технические требования : Национальный стандарт. – М. : Стандартинформ, 2014. – 61 с.

192. Корнев, А. С. Новые электропоезда с тяговым электроприводом постоянного тока / А. С. Корнев, А. Я. Якушев, В. О. Иващенко, Б. Ю. Левитский, О. К. Чандер // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2004. – № 2. – С. 51-55.

193. Якушев, А. Я. Совершенствование системы управления электропоездами / А. Я. Якушев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2012. – № 2 (39). – С. 48-51.

194. 410407-ТМП. Типовые материалы для проектирования. Схемы переездной сигнализации для переездов, расположенных на перегонах при любых средствах сигнализации и связи АПС-04. Альбом 1. Переездная сигнализация на перегонах с автоблокировкой. – М.: ГУП ГИПРОТРАНССИГНАЛСВЯЗЬ, 2004. – 143 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РАЗМЕРЫ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ИССЛЕДУЕМОМУ УЧАСТКУ

Таблица А.1 – Данные ГИД-Урал размеров движения поездов исследуемого участка (нечетное движение)

п/п поезда	Количество вагонов в поезде, ус.ед.	Вес поезда брутто, т	Условная длина поезда, м
1	70	6265	980
2	49	3831	686
3	67	5997	938
4	72	5824	1008
5	72	1927	1008
6	72	6159	1008
7	72	6158	1008
8	68	6256	952
9	92	8916	1288
10	62	5148	868
11	3	173	75
12	72	5916	1008
13	12	726	330
14	13	813	355
15	16	1036	430
16	71	6406	994
17	38	3169	532
18	66	6268	924
19	82	7976	826
20	65	4938	910
21	71	6304	994
22	66	2129	924
23	6	329	120
24	59	1357	826
25	83	7990	1162
26	72	6141	1008
27	69	3707	966
28	72	6158	1008
29	93	8935	1302
30	74	6284	1036
31	64	6271	892
32	73	1862	1022
33	82	7960	1148
34	5	260	105
35	57	3769	798
36	25	3865	350
37	72	2521	1008
38	4	222	90
39	11	667	305
40	14	899	380
41	9	648	255
42	64	6129	896
43	42	2456	588
44	66	5281	924

Таблица А.2 – Данные ГИД-Урал размеров движения поездов исследуемого участка (четное движение)

п/п поезда	Количество вагонов в поезде, ус.ед.	Вес поезда брутто, т	Условная длина поезда, м
1	4	222	90
2	71	1695	1024
3	100	2423	1430
4	78	2316	1122
5	4	249	90
6	100	2420	1430
7	90	2172	1290
8	68	2908	982
9	71	1703	1024
10	82	2135	1178
11	94	4607	1346
12	25	3865	380
13	71	1752	1024
14	39	3192	576
15	4	222	90
16	71	1693	1024
17	86	2323	1234
18	69	4939	996
19	71	1841	1024
20	5	260	105
21	81	2297	1164
22	82	2957	1178
23	90	4821	1290
24	103	2561	1472
25	71	1723	1024
26	70	1661	1010
27	100	2424	1430
28	13	809	355
29	14	906	380
30	100	2399	1430
31	38	1222	562
32	67	4320	968
33	47	2495	688
34	72	1924	1038
35	5	260	105
36	54	2512	786
37	4	249	90
38	82	2954	1178
39	100	2417	1430
40	72	1877	1038
41	90	2184	1290

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**КОД ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СИГНАЛУ РЕФЛЕКТОМЕТРА
МЕСТА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДАТЧИК**

Листинг программы, с помощью которого реализуется алгоритм определения точек вибрационного воздействия от движущегося подвижного состава на основе сигнала распределенного датчика:

```
# инициализация необходимых библиотек Python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.ndimage import gaussian_filter1d

# ввод исходных данных сигнала
data = data2.I1

# фильтрация
filtered_data = gaussian_filter1d(data, 15)

# вычисление градиента
gradient_data = np.gradient(np.gradient(filtered_data))

# определение точек перегиба
inflection_point = np.where(np.diff(np.sign(gradient_data)))[0]

# вывод определенных точек перегиба
print(inflection_point)

# построение графика
plt.figure(figsize=(12,6))

plt.xlabel('N')
plt.ylabel('I, отн.ед')
plt.plot(data, label='Данные')
plt.plot(filtered_data, label='Сглаженные данные')
plt.plot(gradient_data / np.max(gradient_data), label='Вторая производная')
for i, infl in enumerate(infls, 1):
    plt.axvline(x=infl, color='k', label=f'Точка перегиба {i}')
plt.legend(loc="upper right")
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**КОД ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СИГНАЛУ РЕФЛЕКТОМЕТРА
СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА**

Листинг программы, с помощью которого реализуется алгоритм определения скорости движущегося объекта по контролируемому участку на основе сигнала распределенного датчика:

```
# инициализация необходимых библиотек Python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import scipy

# ввод сигнала
data2 = pd.read_csv('3.csv', ';', index_col=False)

# создание функции «Скользящее среднее»
def MovingAverage(series, n):
    rolling_mean = series.rolling(window=n).mean()

# фильтрация сигнала методом «Скользящее среднее»
MovingAverage(data2.I1, 10)
MovingAverage(data2.I2, 10)
data_01_mean=data_01_mean.fillna(0)[10:]
data_02_mean=data_02_mean.fillna(0)[10:]

# дискретное преобразование Фурье
af = scipy.fft(data_04_mean)
bf = scipy.fft(data_03_mean)

# обратное дискретное преобразование Фурье
c = scipy.ifft(af * scipy.conj(bf))

# вычисление времени запаздывания между двумя сигналами
time_shift = np.argmax(abs(c))
```


ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ
ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021663659

Расчет параметров работы устройств автоматической
переездной сигнализации

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (RU)*

Авторы: *Галинуров Ришат Зинфирович (RU), Попов Антон Николаевич (RU)*

Заявка № 2021662792

Дата поступления 10 августа 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 августа 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

**ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**



Акционерное общество
**«Научно-исследовательский и проектно-конструкторский
 институт информатизации, автоматизации и связи
 на железнодорожном транспорте»**

АО «НИИАС». Ростовский филиал

Ленина ул., 44/13, Ростов-на-Дону, 344038; тел./факс: (863) 21-888-77, тел. (863) 259-51-53; secretar@rfniias.ru, reception_rf@vniias.org.rzd
 ОКПО 82462078; ОГРН 1077758841555; ИНН/КПП 7709752846/770901001

28.09.2022 № 260-04/796/1

На № _____ от _____

**СПРАВКА
 ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
 ИССЛЕДОВАНИЯ**

В настоящее время коллектив института выполняет научные исследования и опытно-конструкторские работы в области систем интервального регулирования движения поездов, а также внедряет технические решения по уплотнению потока поездов, в том числе на восточном полигоне ОАО «РЖД». Одним из направлений совершенствования организации перевозочного процесса является переход к пакетной технологии движения при межпоездном интервале в 4 минуты.

Согласно результатам диссертационной работы Галинурова Ришата Зинфировича на тему «Повышение эффективности функционирования железнодорожного переезда» при применении такой технологии поездной работы железнодорожные переезды будут закрыты для автотранспорта до 90% времени. Предложенная в рассматриваемой работе имитационная модель функционирования железнодорожного переезда позволяет исследовать параметры работы переездной сигнализации: длительность и общее время закрытого состояния переезда на участке, основываясь на данных параметров потока движения поездов: скорость движения, длина поезда, величина межпоездного интервала, что позволит сократить время закрытого состояния

переезда для автотранспорта в условиях высокой интенсивности движения поездов и обеспечить возможность работы железнодорожных переездов.

Имитационная модель, предлагаемая автором рассматриваемой работы и полученные с ее помощью результаты представляют интерес и будут использованы для совершенствования технологии управления поездами при проследовании железнодорожных переездов, разработке и проектировании новых систем управления движением поездов.

Заместитель Генерального
директора – директор Ростовского
филиала «Научно-
исследовательский и проектно-
конструкторский институт
информатизации, автоматизации
и связи на железнодорожном
транспорте», кандидат
технических наук



С.Ю. Гришаев



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СЛУЖБА
АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
 ул. Вокзальная, 21
 г. Екатеринбург, 620107,
 Тел.: (343) 358-46-00, факс: (343) 358-46-41,
 E-mail: SHS@svrw.rzd

« 26 » сентября 2022 г. № _____ /СВДИ Ш

На № _____ от _____

Справка

об использовании результатов диссертационной работы
 Галинурова Ришата Зинфировича на тему «Повышение эффективности
 функционирования железнодорожного переезда»

Совершенствование технических решений по управлению автоматической переездной сигнализацией является актуальной задачей, поскольку качественное управление транспортными процессами и безопасностью движения поездов может быть обеспечено за счет динамического регулирования работы устройств железнодорожной автоматики на основе параметров движения поезда.

Особый интерес в области железнодорожной автоматики представляют решения, в которых не используется медный кабель. Исследованию и разработке именно таких решений на основе распределенных волоконно-оптических датчиков посвящена рассматриваемая диссертационная работа.

В диссертации Р.З. Галинурова также рассматриваются вопросы моделирования работы переездной сигнализации. Полученные результаты учтены при разработке опытного образца системы для предотвращения столкновений на железнодорожных переездах при вынужденной остановке автотранспорта, разработанного Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», а также используются при подготовке к испытаниям данного опытного образца на полигоне Свердловской железной дороги.

Начальник



А.Г. Обоскалов

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(УрГУПС)

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе и
связям с производством
Н. Ф. Сирина
09 2022 г.



АКТ


об использовании результатов

диссертационной работы Галинурова Рипата Зинфировича на тему
 «Повышение эффективности функционирования
 железнодорожного переезда» в учебном процессе Федерального
 государственного бюджетного образовательного учреждения
 высшего образования «Уральский государственный университет
 путей сообщения»

Настоящим актом подтверждается, что программа, позволяющая рассчитать и оценить параметры переездной сигнализации с учетом статистических данных движения поездов, разработанная Галинуровым Р.З. на основе результатов диссертационной работы (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663659), внедрена в учебный процесс кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Данная программа используется при проведении практических и лабораторных занятий дисциплины «Системы управления движением поездов на перегоне».


Декан электротехнического факультета,
к.ф.-м.н., доцент

Бапуров В. В.



Заведующий кафедрой
«Автоматика, телемеханика и связь на
железнодорожном транспорте»
к.т.н., доцент

Черезов Г. А.



Доцент кафедры «Автоматика,
телемеханика и связь на
железнодорожном транспорте», к.т.н.

Рожкин Б. В.





ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Комплексные Системы Автоматики»

620107, г. Екатеринбург, ул. Готвальда, дом 22, офис 5; ИНН/КПП 6659159080/667801001

На № 21.09.2022 № С-03/22
 От _____

СПРАВКА

СПРАВКА

об использовании результатов

диссертационной работы Галинурова Ришата Зинфировича на тему
 «Повышение эффективности функционирования железнодорожного
 переезда»

Компания ООО «Комплексные системы автоматики» занимается проектированием и строительством объектов железнодорожной автоматики и телемеханики, а также разработкой систем и устройств обеспечения безопасности движения поездов.

Предложенный в диссертационной работе Галинурова Р.З. метод оценки эффективности функционирования железнодорожного переезда на основе данных движения поездов позволяет на этапе проектных и изыскательских работ обосновать применение конкретных технических решений устройств ограждения и переездной сигнализации.

Результаты научных исследований Галинурова Р.З. нашли применение при разработке проектных решений в части расчетов параметров работы железнодорожного переезда при реконструкции и новом строительстве устройств автоматической переездной сигнализации.

Директор



К. Н. Мálых