

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»**

На правах рукописи

Сорокин Владислав Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИНТЕРВАЛЬНОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО
РАДИОКАНАЛА**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2021

Работа выполнена в ГООВПО «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА», Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чепцов Михаил Николаевич,
ГООВПО «ДОНИЖТ», (г. Донецк),
ректор

Официальные оппоненты: Фамилия, Имя, Отчество
ученая степень, ученое звание, организация/место работы,
должность

Фамилия, Имя, Отчество
ученая степень, ученое звание, организация/место работы,
должность

Ведущая организация: **Полное наименование организации
(в соответствии с уставом)**

Защита состоится «___» _____ г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Методы интервального регулирования движения поездов (ИРДП) являются важной составляющей системы управления на железнодорожном транспорте.

Согласно существующим методам и средствам интервального регулирования движения поездов регулирование ведется на текущую координату «хвоста» идущего впереди поезда, информация о которой передается по радиоканалу при отсутствии разрыва поездов. Системы ИРДП строятся на более высоком уровне по сравнению с существующей инфраструктурой средств автоматики и телемеханики (АТ) железнодорожного транспорта, поэтому если по какой-либо причине во время движения поезда сигнал на приемной радиостанции отсутствует, то узел управления движением локомотива выключается. Машинист локомотива в таком случае ведет поезд по показаниям сигналов автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации. Поскольку путь служебного торможения поезда, идущего сзади, больше пути экстренного торможения поезда, идущего впереди, в случае даже кратковременного отсутствия радиосвязи машинист поезда, идущего сзади, должен приступить к резкому снижению скорости либо даже к экстренному торможению.

Таким образом, существующие методы и средства ИРДП не являются универсальными и гибкими, что оказывает влияние на эксплуатационную эффективность.

Решение перечисленных проблем составляет **актуальную задачу** в плане совершенствования методов и средств интервального регулирования движения поездов. Разработка и реализация усовершенствованных методов и средств интервального регулирования позволит повысить эксплуатационную эффективность систем ИРДП за счет поддержания максимально допустимой скорости движения поездов на участке оборудованном системой ИРДП, даже в случае временного отсутствия радиосвязи между центром радиоблокировки (ЦРБ) и движущимися поездами.

Степень разработанности темы исследования. Внимание ученых, которые специализируются в области систем ИРДП, сосредоточено на вопросах обеспечения безопасности и надежности устройств, а также на рассмотрении технического аспекта анализа и синтеза ИРДП, часто в ущерб проблеме их эксплуатационной эффективности.

В работе Попова П. А. для систем ИРДП разработан метод определения местоположения поездов с высокой достоверностью и надежностью на основе цифровой обработки сигналов рельсовых цепей. В работе Сёмочкина Е. В. повышение эффективности систем ИРДП реализовано за счет методов разбивки перегонов на блок-участки. В работе Романчикова А. М. разработана методика определения необходимой скорости передачи информации между поездами для обеспечения безопасности при координатном способе ИРДП.

Несмотря на значительный вклад ученых и инженеров практиков, работающих по направлению совершенствования интервального регулирования, вопрос эксплуатационной эффективности систем ИРДП в случае отсутствия радиосвязи требует дальнейших исследований.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась на кафедре «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника» ГООВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта». Работа соответствует приоритетным направлениям научных исследований института по созданию новых и совершенствованию существующих технологий работы железнодорожного транспорта, путем разработки методов оптимизации режимов движения поездов, в которых автор принимал участие, как исполнитель.

Цель и задачи исследований. Цель работы – повышение эксплуатационной эффективности систем ИРДП за счет совершенствования методов и средств интервального регулирования движения поездов с учетом времени отсутствия радиосвязи в цифровом радиоканале.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов и средств интервального регулирования, анализ особенностей стандартов цифровой радиосвязи, а также причин отсутствия радиосвязи в системах ИРДП.

2. Разработать модель функционирования системы ИРДП на базе цифрового радиоканала, разработать структурно-функциональную модель и алгоритм функционирования оптимизированной системы интервального регулирования, разработать математическую модель определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи.

3. Провести имитационное компьютерное моделирование математической модели максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения и критерию снижения пропускной способности движения грузовых и пассажирских поездов.

4. Разработать программную реализацию функционирования оптимизированной системы ИРДП, а также провести расчет экономической эффективности от внедрения оптимизированной системы ИРДП на железнодорожном транспорте.

Объект исследования – процесс функционирования систем интервального регулирования движения поездов.

Предмет исследования – методы и средства управления интервальным регулированием движения поездов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложена математическая модель определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системах ИРДП.

2. Получила дальнейшее развитие модель действия помех и искажающих факторов на цифровые системы управления, заключающаяся в том, что

воздействие помех в системе ИРДП может приводить к погрешности вычисления текущей координаты поезда, идущего впереди, а также к погрешности вычисления координаты прицельного торможения поезда, идущего сзади.

3. Получила дальнейшее развитие модель описания динамики движения объектов в цифровых системах, которая заключается в определении координаты прицельного торможения поезда, идущего сзади, на основании прогноза траектории движения поезда.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Предложенная структурно-функциональная модель на основании современных средств интервального регулирования позволяет улучшить организацию движения поездов с установленной скоростью на участке, в случае воздействия помех и искажающих факторов, а также максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи.

Практическая значимость результатов исследования заключается в:

- разработке алгоритма функционирования оптимизированной системы ИРДП;
- разработке программной реализации функционирования оптимизированной системы ИРДП;
- обосновании экономической эффективности по эксплуатации оптимизированной системы ИРДП, принятых к внедрению на ГП «Донецкая железная дорога».

Реализация выводов и рекомендаций работы подтверждается:

- внедрением результатов исследования диссертационной работы в виде рекомендаций по повышению эксплуатационной эффективности систем ИРДП на ГП «Донецкая железная дорога» (справка о внедрении № 2040/1024 от 25.08.21 г. выдана дирекцией по инфраструктуре ГП «Донецкая железная дорога»);

- внедрением в учебный процесс ГОО ВПО «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА» (справка №529/06 от 25.08.21 г. принята к внедрению в учебный процесс при проведении занятий по учебным дисциплинам «Современные беспроводные телекоммуникационные системы и сети», «Микропроцессорные информационные управляющие системы», для студентов направления подготовки 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы: методы математического моделирования на основе теории автоматического регулирования; системный подход к анализу динамических процессов системы ИРДП; корреляционный анализ данных; методология имитационного компьютерного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Впервые разработана модель функционирования оптимизированной системы ИРДП при воздействии помех, искажающих факторов и с учетом максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи, которая позволяет снизить средние потери времени поезда на перегоне на 11,3%, а также снизить средние дополнительные потери энергии поезда на перегоне на 10,8%.

2. Установлено, что использование оптимизированной системы ИРДП позволит в случае отсутствия радиосвязи сохранять допустимый скоростной режим на данном участке в условиях интенсивного движения поездов при соблюдении минимального межпоездного интервала следования.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, подкреплены фактическими данными, наглядно представленными в приведенных таблицах и рисунках. Подготовка, анализ, а также интерпретация полученных результатов диссертационных исследований проведены с использованием современных методов обработки информации, статистического анализа и имитационного компьютерного моделирования.

Апробация результатов диссертации.

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: III Международной Научно – практической конференции «Научно – технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», г. Донецк, 2017 г.; IV Международной научно – практической конференции «Научно – технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», г. Донецк, 2018 г.; XV Международной научно – практической конференции: «Актуальные проблемы развития транспортно – промышленного комплекса: инфраструктурный, управленческий и образовательный аспекты», г. Донецк, 2018 г.; VI Международной научно – практической конференции (дистанционной) «Научно – технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», г. Донецк, 2020 г.; XVII Международной научно – практической конференции: «Актуальные проблемы развития транспортно – промышленного комплекса: инфраструктурный, управленческий и образовательный аспекты», г. Донецк, 2020 г.; VIII Международной научно – практической конференции «Научно – технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», г. Донецк, 2021 г.

Личный вклад соискателя состоит в формулировании цели исследований, задач исследований, основных научных положений и выводов, разработке математических моделей, разработке алгоритма, аналитических исследований, разработке практических рекомендаций по применению результатов.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе: 3 работы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный ВАК ДНР; 1 работа в издании, входящем в перечень специализированных научных изданий, утвержденный ВАК Российской Федерации; 6 – по материалам конференций.

Соответствие темы и содержания диссертации паспорту специальности.

Тема и содержание диссертации «Совершенствование методов и средств интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала» соответствуют требованиям паспорта специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)», в частности: п.4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; п.5 «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСПП и др.»; п.17 «Использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации АСУ»; п.18 «Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 146 источников, 2 приложений на 3-х страницах, содержит 28 рисунков и 15 таблиц. Общий объем текста диссертации – 140 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе работы «Анализ методов и средств интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала» проведен анализ существующих методов интервального регулирования, анализ существующих систем ИРДП, а также анализ особенностей стандартов цифровой радиосвязи и причин отсутствия радиосвязи в системах ИРДП на базе цифрового радиоканала.

В системах ИРДП особое внимание уделяется скорости движения поездов и пропускной способности железнодорожных линий, как средствам улучшения других показателей работы железных работ. В существующих системах ИРДП если по какой-либо причине после начала движения поезда сигнал на приемнике *RWR* радиостанции *RW* о координате идущего впереди поезда отсутствует, то узел управления движением локомотива *AN* выключается. Машинист в таком случае ведет поезд по показаниям сигналов автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации.

Поскольку путь служебного торможения поезда, идущего сзади больше пути экстренного торможения поезда, идущего впереди, то в случае даже

кратковременного отсутствия радиосвязи, машинист поезда, идущего сзади должен приступить к резкому снижению скорости, либо даже к экстренному торможению. Это приводит к снижению скорости или даже остановке поезда, в свою очередь приводит к ненужным остановкам поездов, сопровождающихся потерями времени и энергии при замедлениях и разгонах.

Причины и искажающие факторы, которые могут привести к отсутствию радиосвязи в системах ИРДП могут быть естественного характера (непреднамеренные) и искусственного характера (преднамеренные).

К непреднамеренным причинам можно отнести внешние электромагнитные влияния от различных источников. К преднамеренным причинам можно отнести подавление радиосигнала с помощью радиоглушилок, а также спуфинг-атаки.

Для организации радиосвязи системы ИРДП используют радиоволны ультракороткого диапазона (УКВ). Волны УКВ диапазона имеет два недостатка: они не огибает земную поверхность и большие препятствия; сильно поглощается в почве (Рисунок 1).

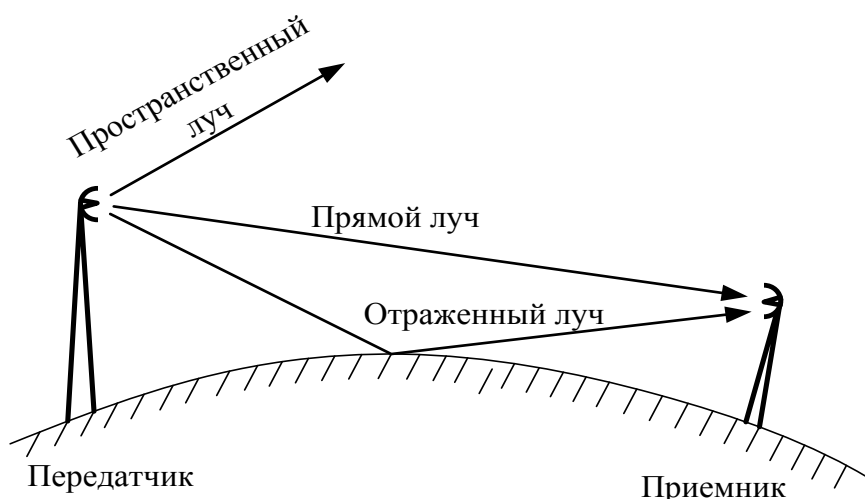


Рисунок 1 – Распространение радиоволн УКВ диапазона

С учетом специфики сильно изменяющегося рельефа местности, который имеет большое количество оврагов и балок, в работе систем ИРДП возможны ситуации возникновения отсутствия радиосвязи (зона молчания) между ЦРБ и движущимися поездами (Рисунок 2).

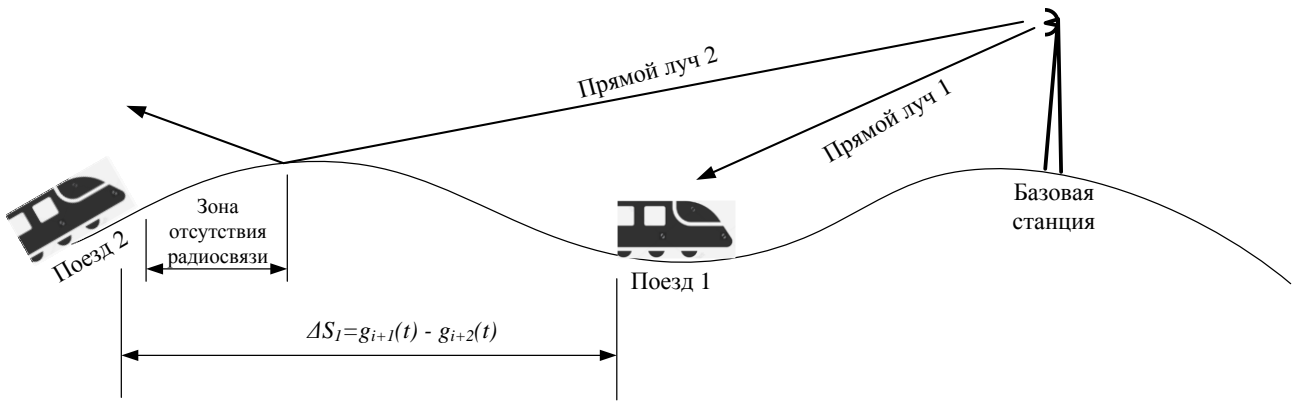


Рисунок 2 – Зона отсутствия радиосвязи

где ΔS – безопасная кривая торможения поезда 2 в точку прицеливания; $g_{i+1}(t)$ и $g_{i+2}(t)$ – текущие координаты поездов 1 и 2 соответственно (определяются бортовыми устройствами одометрии).

Основными причинами отсутствия радиосвязи в системе ИРДП являются: отсутствие зоны прямой видимости из-за рельефа местности, наличия искусственных сооружений между радиопередатчиком и радиоприемником; подавление радиосигнала системы ИРДП. Отсутствие радиосвязи приводит к резкому снижению скорости поезда, либо даже к экстренному торможению, что в свою очередь приводит к потерями времени и энергии при замедлениях и разгонах поездов.

Во втором разделе «Синтез моделей функционирования систем интервального регулирования» приведена модель функционирования системы ИРДП на базе цифрового радиоканала, а также разработана модель функционирования системы ИРДП с учетом воздействия помех и искажающих факторов (Рисунки 3 и 4).

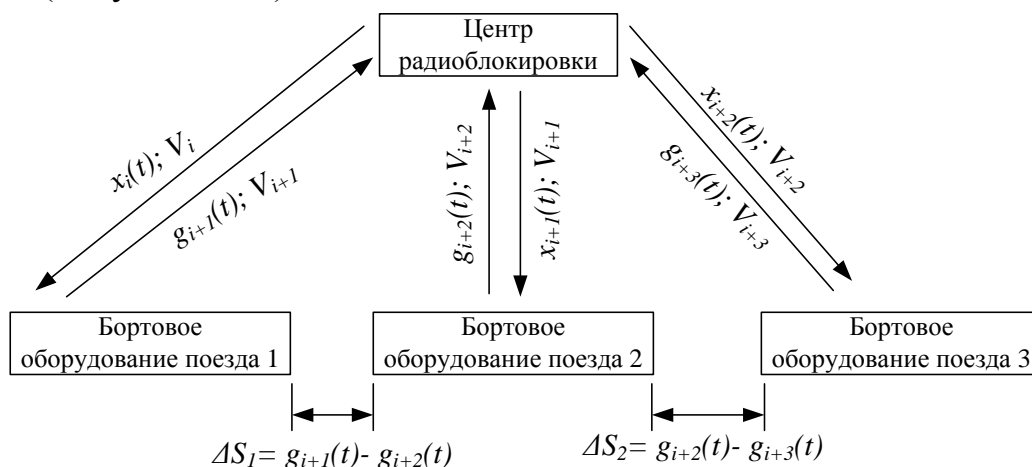


Рисунок 3 – Модель функционирования системы ИРДП на базе цифрового радиоканала

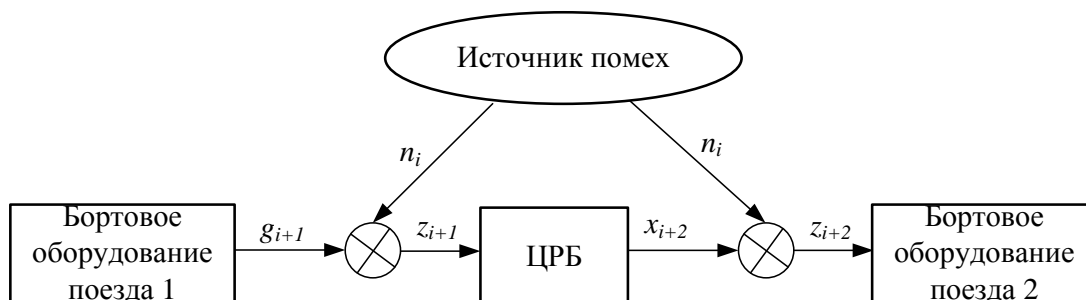


Рисунок 4 – Модель функционирования системы ИРДП с учетом воздействия помех и искажающих факторов

Согласно модели (Рисунок 4) на вход ЦРБ (с выхода радиоканала) действует сумма z_{i+1} текущей координаты поезда $g_{i+1} = \tilde{g}(t_i)$ и помех $n_i = n(t_i)$. На вход бортового оборудования поезда 2 аналогично действует сумма z_{i+2} координаты прицельного торможения x_{i+2} и помех $n_i = n(t_i)$. В результате в радиосигналах, которые поступают в ЦРБ и бортовое оборудование поезда 2, содержится случайная составляющая, которую можно охарактеризовать величиной дисперсии σ_n^2 .

Воздействие помех в системе ИРДП может приводить к погрешности вычисления как текущей координаты поезда g_{i+1} , так и погрешности вычисления координаты прицельного торможения x_{i+2} (конец защитного участка).

В системе ИРДП описанию динамики движения поездов соответствует разностное уравнение $g_i = \nu g_{i-1} + \xi_i$, где ν – постоянный коэффициент; ξ_i – гауссовские независимые случайные величины с дисперсией σ_ξ^2 .

Поэтому в системе ИРДП можно определить вероятностные характеристики возможных траекторий поездов в дискретном времени. В результате получаем $\sigma_g^2 = \nu \sigma_g^2 + \sigma_\xi^2$ или $\sigma_g^2 = \frac{\sigma_\xi^2}{1-\nu}$. Данная величина дисперсии σ_g^2 определяет динамический диапазон возможных отклонений траектории движения поезда от среднего значения.

Другим параметром, описывающим движение поезда, является характеристика скорости изменения траектории движения поезда. Для системы ИРДП в качестве такой меры скорости можно использовать коэффициент корреляции двух соседних значений текущих координат поезда $g(t_{i-1}) = g_{i-1}$ и $g(t_i) = g_i$:

$$M\{g_i g_{i-1}\} = \nu M\{g_{i-1}^2\} + M\{\xi g_{i-1}\}. \quad (1)$$

Поскольку $M\{\xi g_{i-1}\} = 0$, то коэффициент корреляции $\frac{M\{g_i g_{i-1}\}}{M\{g_{i-1}^2\}} = \nu$.

Таким образом, параметр $|\nu| < 1$ оказывается равным значению коэффициента корреляции двух соседних траекторий движения поезда.

Для повышения точности динамического расчета максимально допустимой скорости движения поезда в конкретной точке пути, а также точности определения координаты «хвоста» (минимального удаления позиции «хвоста» поезда) впереди идущего поезда в системе ИРДП, при условии воздействия помех и отсутствия радиосвязи, основной задачей является минимизация дисперсии ошибки $\varepsilon_i = x_i - g_i$ точности системы.

Для разрабатываемой оптимизированной системы ИРДП можно сформулировать следующую модель функционирования:

$$x_i = x_{\varepsilon i} + P_i \frac{1}{\sigma_n^2} (z_i - x_{\varepsilon i}), \quad P_i = \frac{P_{\varepsilon i}}{1 + \frac{1}{\sigma_n^2} P_{\varepsilon i}}, \quad P_{\varepsilon i} = v^2 P_{i-1} + \sigma_{\xi}^2, \quad (2)$$

где $x_{\varepsilon i} = vx_{i-1}$.

В модели (2) величина $x_{\varepsilon i}$ является экстраполированной на один шаг траектории движения поезда или прогнозом значения траектории поезда. На предыдущем шаге состояние системы ИРДП было x_{i-1} . Динамика изменения траектории поезда описывается уравнением $g_i = vg_{i-1} + \xi_i$. Наиболее оптимальным в системе ИРДП с точки зрения прогноза траектории движения поезда g_i это предсказать, что сигнал g_i будет иметь величину $x_{\varepsilon i} = vx_{i-1}$.

Таким образом, в разрабатываемой оптимизированной системе ИРДП вначале должен быть сформирован прогноз $x_{\varepsilon i}$ траектории движения поезда по известным соотношениям правил тяговых расчетов для поездной работы. Затем необходимо определить рассогласование $z_i - x_{\varepsilon i}$ между сделанным прогнозом и очередным сигналом z_i (поступающим в ЦРБ), который искажен помехами, либо из-за отсутствия радиосвязи. После этого очередное состояние системы ИРДП x_i формируется как сумма прогноза $x_{\varepsilon i}$ и взвешенного рассогласования.

Весовым коэффициентом p_i / σ_n^2 служит отношение дисперсии ошибки системы ИРДП p_i и дисперсии помех, действующих на систему ИРДП.

Разработанная структурно-функциональная модель оптимизированной системы ИРДП, согласно модели функционирования (2), с учетом максимально возможного времени отсутствия радиосвязи (Рисунок 5).

Для структурно-функциональной модели оптимизированной системы ИРДП разработан алгоритм функционирования системы ИРДП (Рисунок 6).

Для структурно-функциональной модели оптимизированной системы ИРДП разработана модель определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи. По причине отсутствия радиосвязи в системе ИРДП может быть нарушена безопасность движения поездов, а также произойдет снижение пропускной способности движения поездов. В связи с этим сформулированы критерий обеспечения безопасности и критерий снижения пропускной способности движения поездов, системы ИРДП.

Критерий обеспечения безопасности движения – это отсутствие возможности столкновения поездов при наихудших условиях и минимальном допустимом интервале следования поездов $L_{u min}$ в случае временного отсутствия радиосвязи в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала.

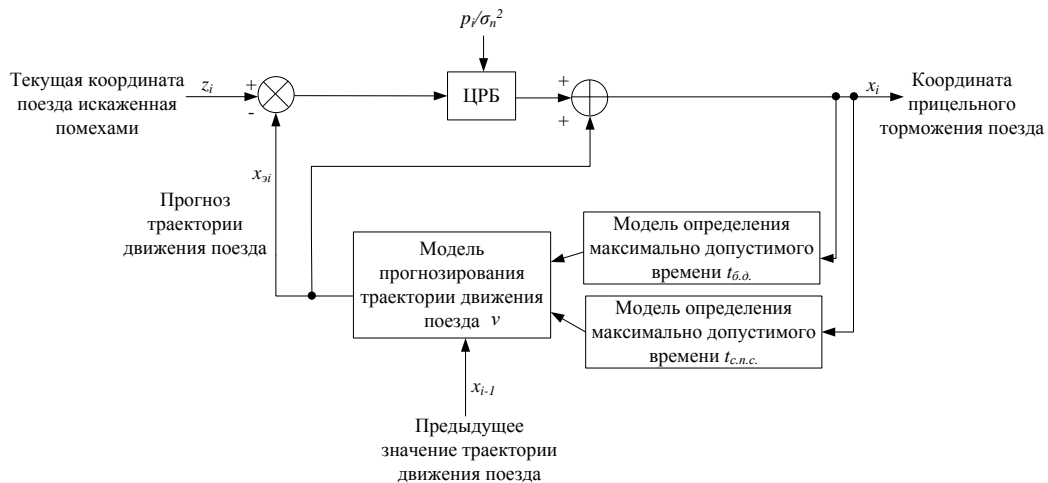


Рисунок 5 – Структурно-функциональная модель оптимизированной системы ИРДП

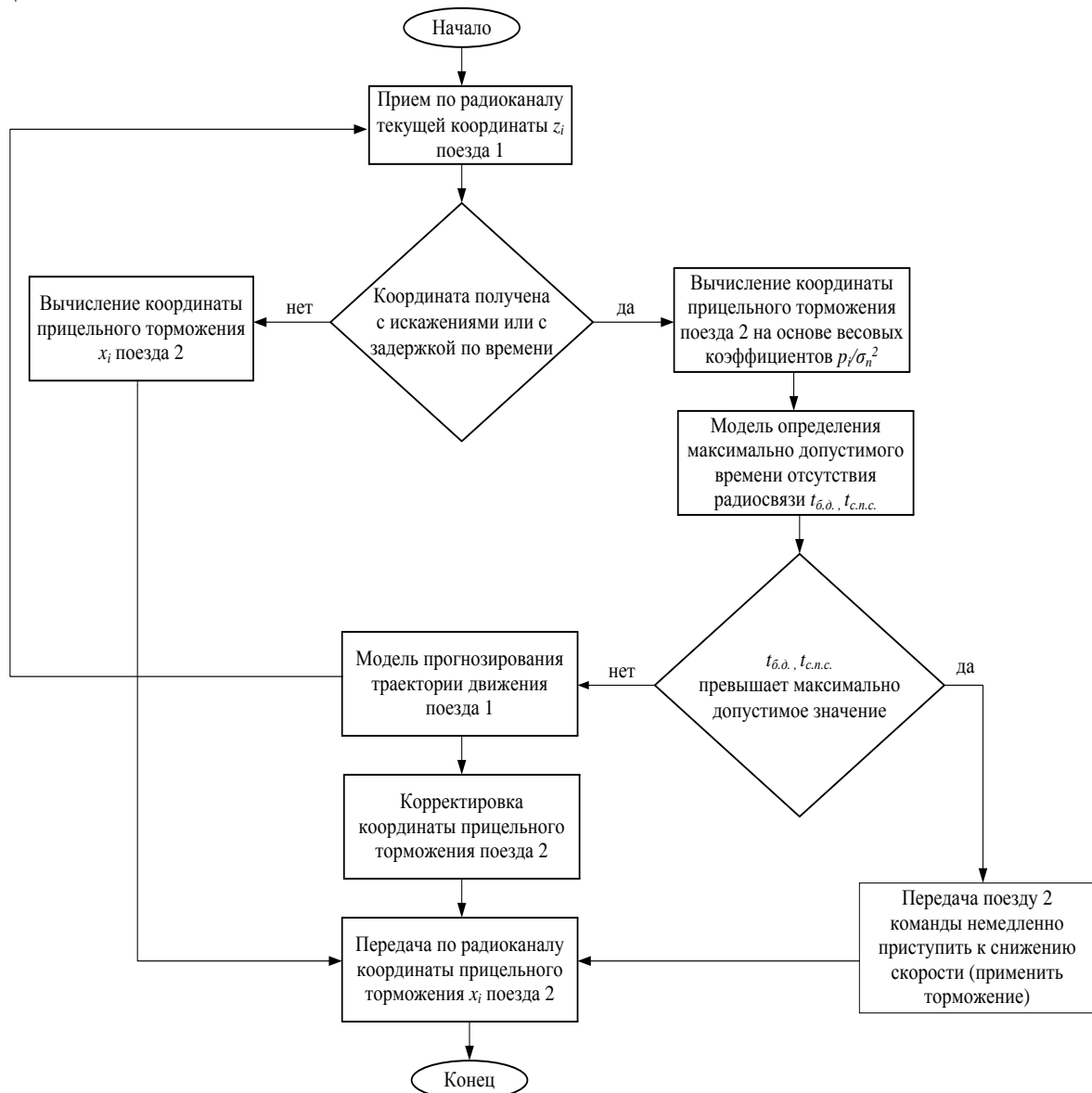


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования оптимизированной системы ИРДП

Критерий снижения пропускной способности – это неоправданное снижение скорости поезда, идущего сзади (поезд 2), если поезд, идущий впереди (поезд 1), начал снижать скорость, но продолжает движение, в случае временного отсутствия радиосвязи в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала.

В качестве наихудших условий, с точки зрения системы ИРДП, рассмотрен случай экстренного торможения поезда 1 вплоть до полной остановки $V_{1\phi} = 0$ км/ч, с точки зрения поезда 2, для которого рассчитывается безопасная кривая торможения в точку прицеливания x_{i+2} , при этом поезд 2 движется с максимально допустимой скоростью для данного участка V_{2max} .

В системе ИРДП межпоездной интервал ΔS рассчитывается с учетом защитного участка. Поэтому при кратковременном отсутствии радиосвязи, будет неоправданно снижение скорости, или торможения идущего сзади поезда 2, с точки зрения минимального интервала следования поездов $L_{u min}$.

Минимально допустимый интервал следования поездов $L_{и min}$ можно определить по формуле, м:

$$L_{и min} > S_1 + S_{запас} \quad (3)$$

где S_1 – максимальный тормозной путь поезда 1; $S_{запас}$ – запас межпоездного интервала, больший или равный длине блок-участка.

Согласно эксплуатационно-техническим требованиям к системам ИРДП запас безопасного интервала, следующих друг за другом поездами, достаточного для остановки машинистом локомотива с применением служебного торможения, должен быть не менее 300 метров, то есть $S_{запас} = 300$ м.

В общем виде максимально допустимое время отсутствия радиосвязи в работе системы ИРДП $t_{max доп}$ будет определяться по формуле, сек:

$$t_{max доп} = t_1 - t_2 \quad (4)$$

где t_1 – время движения поезда 2 с максимально допустимой скоростью движения V_{2max} на данном участке (вплоть до возможного столкновения с поездом 1, который применил экстренное торможение); t_2 – время которое будет затрачено поездом 1 (вплоть до полной остановки) при экстренном торможении.

Разработана модель определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для критерия снижения пропускной способности поездов, сек:

$$t_{c.n.c.} = \frac{L_{u min} + [V_{1\phi} * (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) * 2S_1}{V_{1max}^2}) + \frac{V_{1max}^2 * (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) * 2S_1}{V_{1max}^2})^2}{2S_1}]}{V_{2max}} - \frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) * 2S_1}{V_{1max}^2} \quad (5)$$

При условии, что поезд 1 во время экстренного торможения полностью остановится (то есть $V_{1\phi} = 0$ м/с), была разработана модель определения

максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для критерия обеспечения безопасности движения поездов, сек:

$$t_{б.д.} = \frac{L_{u\ min} + [V_{1\phi} * (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) * 2S_1}{V_{1max}^2}) + \frac{V_{1max}^2 * (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) * 2S_1}{V_{1max}^2})^2}{2S_1}]}{V_{2max}} - \frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) * 2S_1}{V_{1max}^2} =$$

$$= \frac{L_{u\ min} + S_1}{V_{2max}} - \frac{2S_1}{V_{1max}} \quad (6)$$

Модели определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в составе структурно-функциональной модели оптимизированной системы ИРДП, в условиях интенсивного движения поездов, при условии минимального межпоездного интервала следования $L_{u\ min}$, в случае отсутствия радиосвязи, позволят полностью исключить вероятность опасного сближения поездов, а также соблюдать допустимый скоростной режим движения поездов на участке.

В третьем разделе «Моделирование максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования» на основании правил тяговых расчетов для поездной работы, при помощи метода интервалов скорости, выполнен расчет максимального тормозного пути S_I для грузовых и пассажирских поездов, при наихудших условиях. В результате были получены зависимости изменения максимального тормозного пути S_I для грузовых и пассажирских поездов, при различных фактических скоростях движения поезда $V_{1\phi}$ (Рисунки 7 и 8).

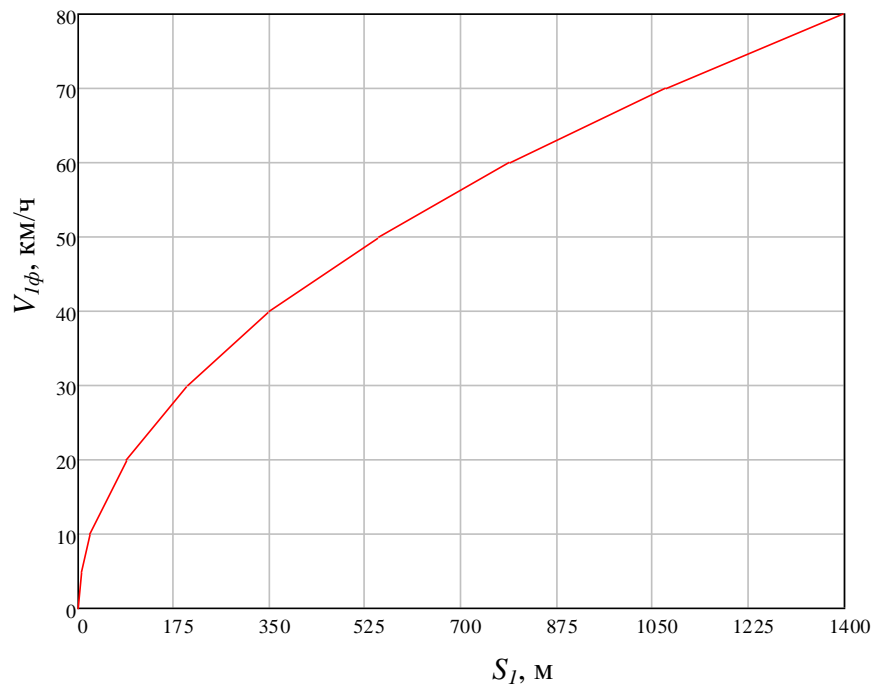


Рисунок 7 – Максимальный тормозной путь грузового поезда

Для моделирования максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи произведен расчет минимально допустимого интервала следования $L_{u min}$ грузовых и пассажирских поездов.

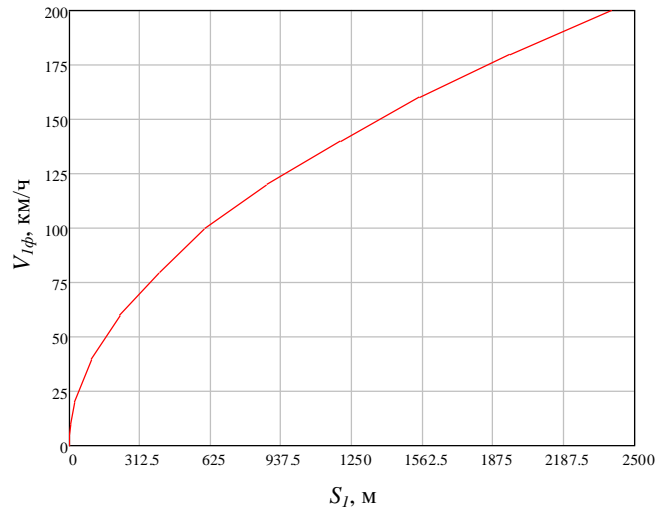


Рисунок 8 – Максимальный тормозной путь пассажирского поезда

На основании полученных данных максимального тормозного пути и минимально допустимого интервала следования, проведено моделирование максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию снижения пропускной способности грузовых и пассажирских поездов (Рисунки 9 и 10).

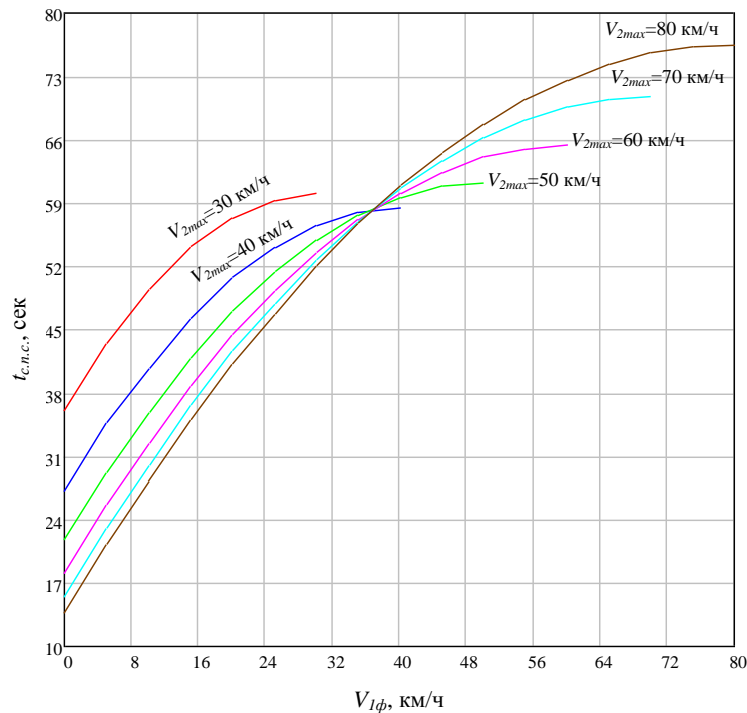


Рисунок 9 – Результаты моделирования максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию снижения пропускной способности грузовых поездов

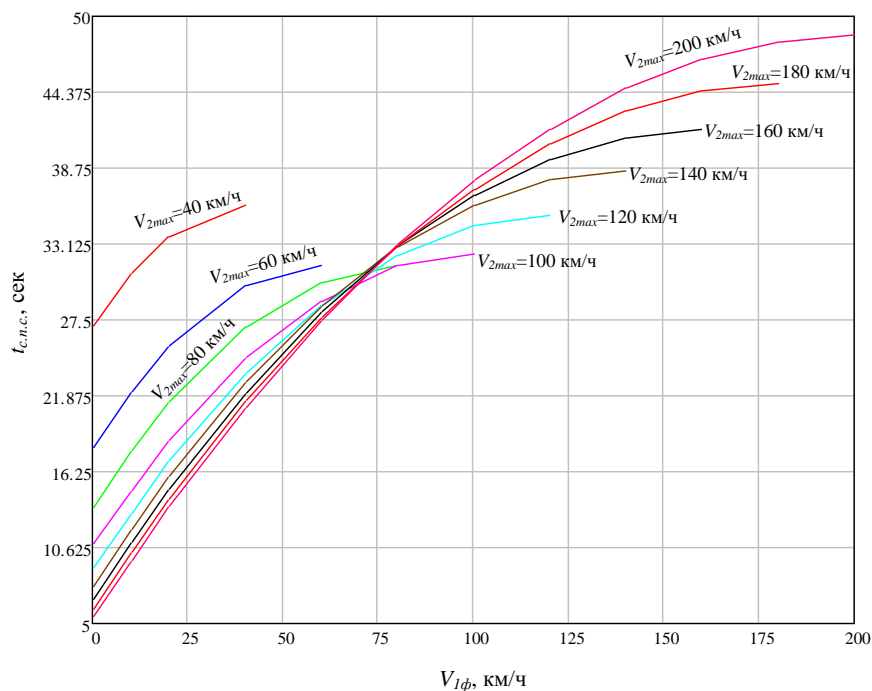


Рисунок 10 – Результаты моделирования максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию снижения пропускной способности пассажирских поездов

Так же проведено моделирование максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения грузовых и пассажирских поездов (Рисунки 11 и 12).

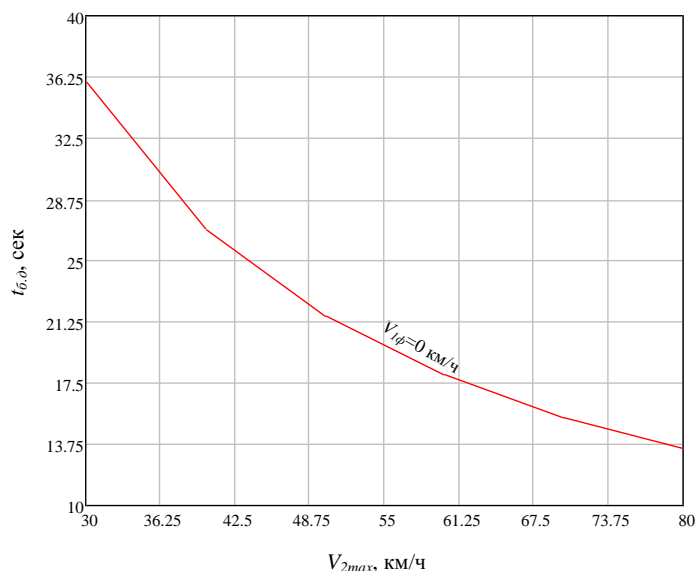


Рисунок 11 – Результаты моделирования максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения грузовых поездов

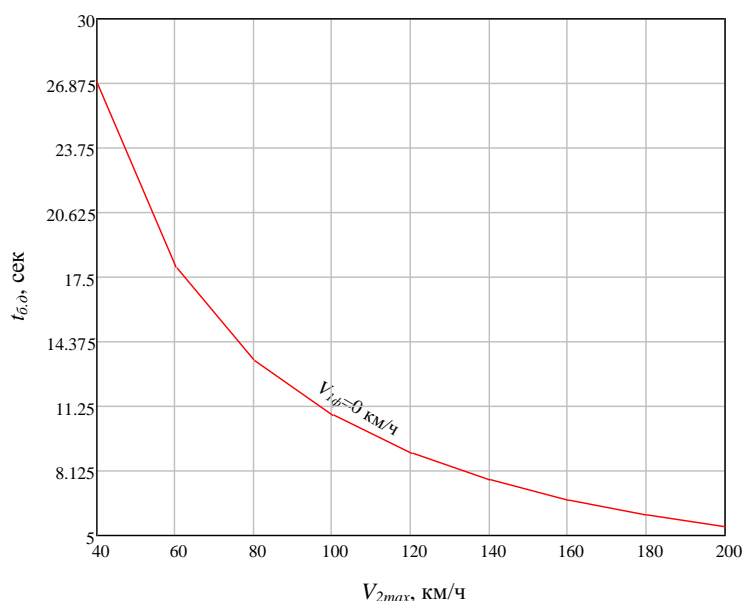


Рисунок 12 – Результаты моделирования максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения пассажирских поездов

Для оценки адекватности полученных зависимостей максимального времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения поездов был использован критерий Фишера.

Пусть имеются две независимые выборки скоростей движения поездов: оптимизированной системы ИРДП x_1, \dots, x_{n1} и реальной системы ИРДП y_1, \dots, y_{n2} имеющие нормальное распределение с параметрами (a_x, σ_x^2) и (a_y, σ_y^2) . Необходимо проверить гипотезу равенства дисперсий σ_x^2 и σ_y^2 опираясь на их выборочные оценки при доверительной вероятности $p=0,95$ (Рисунки 13 и 14).

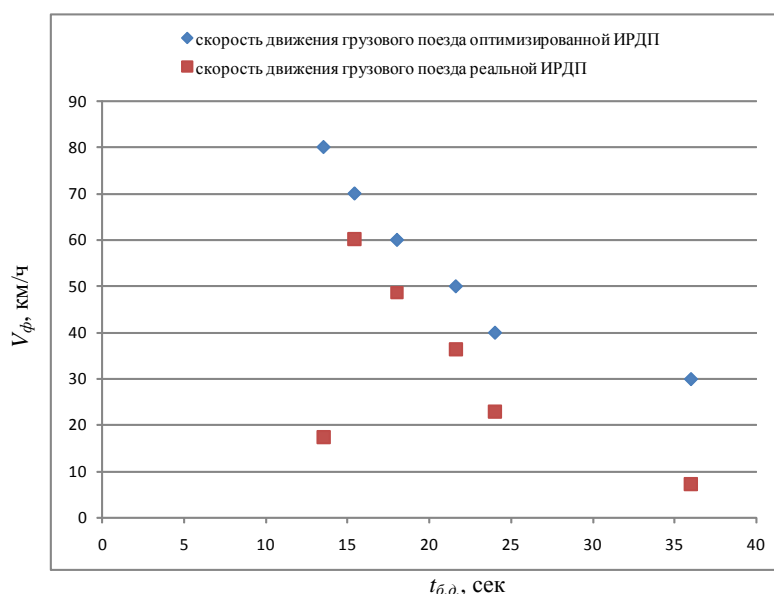


Рисунок 13 – Зависимости скоростного режима движения грузовых поездов реальной и оптимизированной систем ИРДП

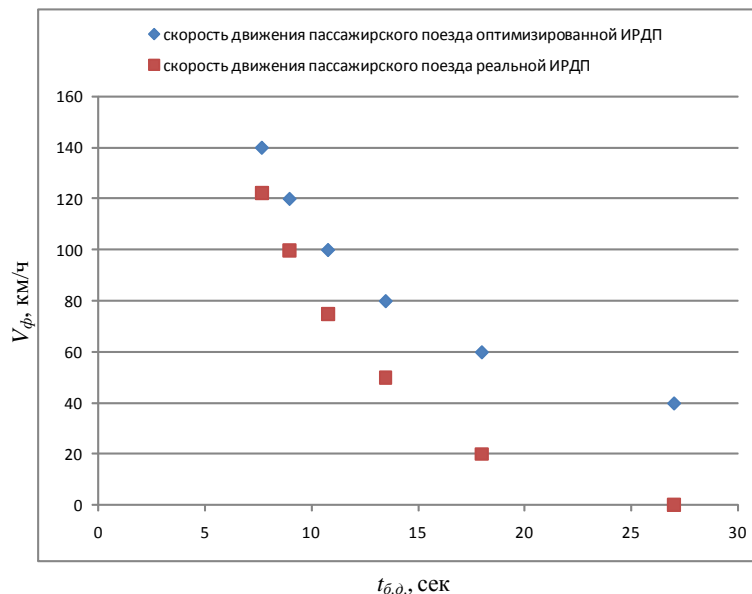


Рисунок 14 – Зависимости скоростного режима движения пассажирских поездов реальной и оптимизированной систем ИРДП

На основании расчетов делаем вывод, что разработанная модель максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения грузовых и пассажирских поездов оптимизированной системы ИРДП при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальному поведению системы в случае отсутствия радиосвязи между ЦРБ и движущимися поездами.

Учет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию снижения пропускной способности $t_{с.н.с.}$, позволит поезду 2 за время отсутствия радиосвязи продолжать движение с фактической скоростью $V_{1\phi}$, которая может достигать максимально допустимую скорость V_{2max} для данного участка.

Для реализации критерия обеспечения безопасности движения поездов, максимально допустимое время отсутствия радиосвязи $t_{б.д.}$ должно составлять время, за которое поезд 2 пройдет расстояние в 300 метров ($S_{занас}$) на максимально допустимой скорости V_{2max} для данного участка.

В четвертом разделе «Программная реализация и экономическая эффективность от внедрения оптимизированной системы интервального регулирования» были представлены эксплуатационно-технические требования и инфраструктура системы ИРДП на базе цифрового радиоканала (Рисунок 15), разработана программная реализация оптимизированной системы ИРДП, а также приведена экономическая эффективность от внедрения оптимизированной системы ИРДП.

Расчет экономической эффективности от внедрения оптимизированной системы ИРДП был проведен на основе снижения затрат времени и энергии в случае отсутствия радиосвязи.

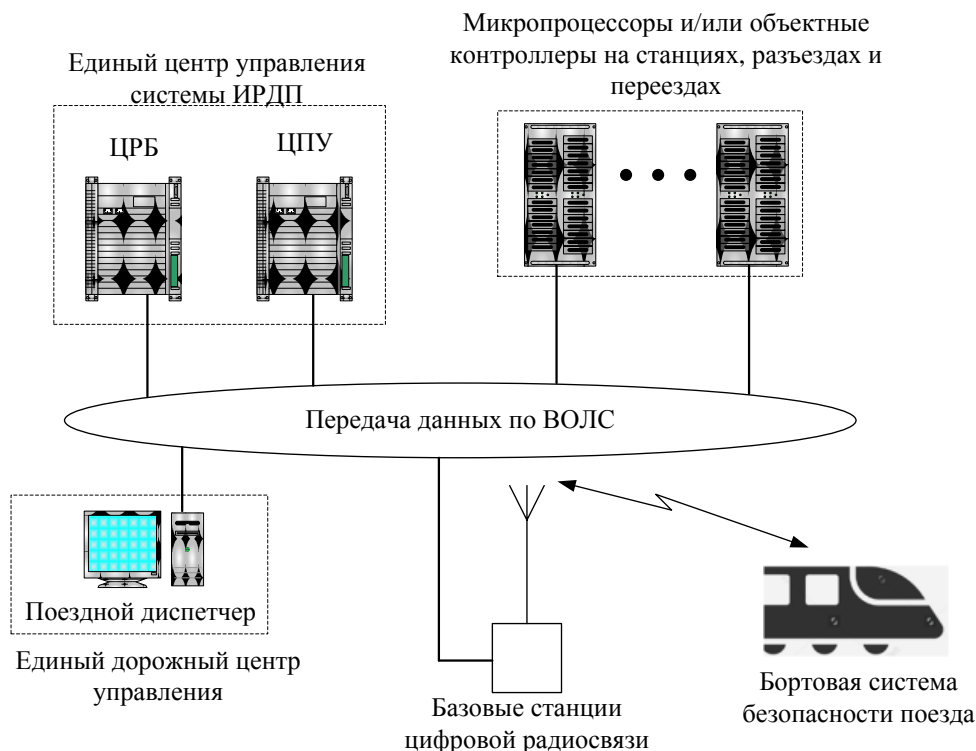


Рисунок 15 – Инфраструктура системы ИРДП

В результате расчетов, на основе экспериментальных данных опытных поездок динамометрического вагона по различным перегонам, средние потери времени на перегонах составили 32 минуты, что составляет 11,3%. Средние дополнительные потери энергии поездов на перегонах составили 1150 кВт*ч, что составляет 10,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой получено решение важной научно технической задачи совершенствование методов и средств интервального регулирования движения поездов с учетом времени отсутствия радиосвязи в цифровом радиоканале, что позволит повысить эксплуатационную эффективность систем ИРДП.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы:

1. Анализ существующих систем ИРДП показал, что при отсутствии радиосигнала между ЦРБ и движущимся поездом скорость движения поезда регулируется на координаты светофоров, установленных на пути. Для поезда идущего сзади пропадание радиосигнала о координате «хвоста» поезда идущего впереди, является сигналом о прекращении работы радиоканала и необходимости перехода на другие способы ИРДП, а это в свою очередь приводит к снижению скорости движения поезда или экстремному торможению.

2. Анализ причин отсутствия радиосвязи в системах ИРДП показал, что помехи и искажающие факторы, которые могут привести к отсутствию радиосвязи могут быть преднамеренными и непреднамеренными. Основными причинами отсутствия радиосвязи в системе ИРДП являются: отсутствие зоны прямой видимости из-за рельефа местности, а также наличия искусственных сооружений между радиопередатчиком и радиоприемником; подавление радиосигнала, при помощи генерации шумоподобного сигнала на частотах передачи системы ИРДП.

3. Разработана модель функционирования системы ИРДП на базе цифрового радиоканала и модель функционирования системы ИРДП с учетом действия помех и искажающих факторов.

4. Разработана модель функционирования оптимизированной системы ИРДП, на основании которой разработана структурно-функциональная модель оптимизированной системы ИРДП с учетом максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи. Разработан алгоритм функционирования оптимизированной системы ИРДП.

5. Разработана модель определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения поездов и критерию снижения пропускной способности движения грузовых и пассажирских поездов.

6. Проведено моделирование максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности и критерию снижения пропускной способности, с учетом минимально допустимого интервала следования поездов, которое показало, что учет значения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системе ИРДП, позволит полностью исключить вероятность опасного сближения поездов, а также соблюдать допустимый скоростной режим движения поездов.

7. Проведена оценка адекватности модели максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения грузовых и пассажирских поездов на основании критерия Фишера, которая показала, что предложенная модель максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальному поведению системы ИРДП.

8. Разработана программная реализация функционирования оптимизированной системы ИРДП, а также подтверждена экономическая эффективность от внедрения оптимизированной системы ИРДП, на основании снижения затрат времени и энергии в случае отсутствия радиосвязи.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССРЕТАЦИИ

– в рецензируемых научных изданиях ВАК ДНР:

1. **Сорокин, В.Е.** Анализ пропускной способности систем подвижной радиосвязи в режиме передачи данных системы диспетчерского управления / **В.Е. Сорокин** // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. Донецк, ДОНИЖТ, – 2018. – №50. – С. 21-25.

2. **Сорокин, В.Е.** Синтез модели работы оптимальной системы интервального регулирования движением поездов на базе цифрового радиоканала / **В.Е. Сорокин, М.Н.Чепцов** // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. Донецк, ДОНИЖТ, – 2020. – №58. – С. 10-20.

3. **Сорокин, В.Е.** Алгоритм работы и программная реализация оптимизированной системы интервального регулирования движения поездов / **В.Е. Сорокин** // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. Донецк, ДОНИЖТ, – 2021. – №61. – С. 25-30.

– в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ:

4. **Сорокин, В.Е.** Расчет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движением поездов на базе цифрового радиоканала / **В.Е. Сорокин, М.Н.Чепцов** // Научно – технический журнал «Известия Транссиба». Омск, ОмГУПС, – 2020. – №4(44). – С. 127-134.

– в других изданиях

5. **Сорокин, В.Е.** Оценка влияния многолучевого прохождения и дополнительного отражения на GPS сигналы / **В.Е. Сорокин.** Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли» в рамках Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. Донецк, 2015. – С. 151-155.

6. **Сорокин, В.Е.** Анализ современного развития телекоммуникационных сетей железнодорожного транспорта / **В.Е. Сорокин.** Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта» в рамках III – го Международного научного форума Донецкой Народной Республики. Донецк, 2017. – С. 152-153.

7. **Сорокин, В.Е.** Анализ преимуществ и недостатков технологий 3G и 4G для использования в системах диспетчерского управления / **В.Е. Сорокин.** XV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы развития транспортно-промышленного комплекса: инфраструктурный, управленческий и образовательный аспекты». Донецк, 2018. – С. 31-34.

8. **Сорокин, В.Е.** Повышение эффективности систем интервального регулирования движением поездов на базе цифрового радиоканала / **В.Е. Сорокин.** VI Международная научно-практическая конференция «Научно-

технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта». Донецк, 2020. – С. 88-92.

9. **Сорокин, В.Е.** Сравнительный анализ стандартов TETRA, GSM-R и DMR для использования в системах интервального регулирования движением поездов **В.Е. Сорокин.** XVII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы развития транспортно-промышленного комплекса: инфраструктурный, управленческий и образовательный аспекты». Донецк, 2020. – С. 21-24.

10. **Сорокин, В.Е.** Инфраструктура и взаимодействие подсистем интервального регулирования движения поездов **В.Е. Сорокин.** VII Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта». Донецк, 2021. – С. 72-74.

Личный вклад соискателя в публикациях: [1, 6, 7, 9] установлено, что технологии цифровой радиосвязи имеют различную полосу пропускания и скорость передачи данных, наиболее подходящей технологией для организации системы ИРДП является DMR; [2] разработана структурно-функциональная модель оптимизированной системы ИРДП при воздействии помех и искажающих факторов; [4, 5, 8] установлены причины отсутствия радиосвязи между подвижными объектами, такие как отражения и многолучевое прохождение радиосигналов; [2, 4] произведен расчет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для грузовых поездов по критерию обеспечения безопасности движения и критерию снижения пропускной способности движения поездов; [3] разработаны алгоритм работы и программная реализация оптимизированной системы интервального регулирования движения поездов; [10] установлены основные функции центра радиоблокировки и бортовой части поезда, а также их взаимодействие с другими подсистемами ИРДП.

АННОТАЦИЯ

Сорокин В. Е. Совершенствование методов и средств интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала. – Рукопись.

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки). – ГОУВПО «ДОННТУ», Донецк, 2021 г.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в совершенствовании методов и средств интервального регулирования движения поездов с учетом времени отсутствия радиосвязи в цифровом радиоканале, что позволит повысить эксплуатационную эффективность систем ИРДП.

Анализ существующих систем ИРДП показал, что в случае отсутствия радиосвязи между ЦРБ и поездами происходит снижение скорости движения поездов или экстренное торможение.

Анализ причин отсутствия радиосвязи в системах ИРДП показал, что помехи и искажающие факторы, которые могут привести к отсутствию радиосвязи могут быть преднамеренными и непреднамеренными. Основными причинами отсутствия радиосвязи в системе ИРДП являются отсутствие зоны прямой видимости из-за рельефа местности и подавление радиосигнала.

Разработана модель функционирования системы ИРДП на базе цифрового радиоканала и модель функционирования системы ИРДП с учетом действия помех и искажающих факторов.

Разработана модель функционирования оптимизированной системы ИРДП, на основании которой разработана структурно-функциональная модель оптимизированной системы ИРДП с учетом максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи. Разработан алгоритм функционирования оптимизированной системы ИРДП.

Разработана модель определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения поездов и критерию снижения пропускной способности движения грузовых и пассажирских поездов.

Проведено моделирование максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности и критерию снижения пропускной способности.

Проведена оценка адекватности модели максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения грузовых и пассажирских поездов на основании критерия Фишера, предложенная модель при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальному поведению системы ИРДП.

Разработана программная реализация функционирования оптимизированной системы ИРДП, а также подтверждена экономическая эффективность от внедрения оптимизированной системы ИРДП, на основании снижения затрат времени и энергии в случае отсутствия радиосвязи.

Ключевые слова: интервальное регулирование, причины отсутствия радиосвязи, время отсутствия радиосвязи.

ANNOTATION

Sorokin V.E. **Improvement of methods and means of interval regulation of train traffic on the basis of a digital radio channel.** - Manuscript.

Theses for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.06 – Automation and control of technological processes and production (by industry) (technical sciences). – DONNTU, Donetsk, 2021.

In the dissertation, an urgent scientific and technical problem is solved, which consists in improving the methods and means of interval regulation of train traffic, taking into account the time of absence of radio communication in a digital radio channel, which will increase the operational efficiency of IRDP systems.

The analysis of the existing IRDP systems showed that in the absence of radio communication between the Central District Hospital and the trains, the speed of train movement or emergency braking occurs.

Analysis of the reasons for the lack of radio communication in the IRDP systems showed that the interference and distorting factors that can lead to the lack of radio communication can be intentional and unintentional. The main reasons for the lack of radio communication in the IRDP system are the absence of a line-of-sight zone due to the terrain and suppression of the radio signal.

A model of the functioning of the IRDP system based on a digital radio channel and a model of the functioning of the IRDP system, taking into account the effect of interference and distorting factors, have been developed.

A model of functioning of the optimized IRDP system has been developed, on the basis of which a structural-functional model of the optimized IRDP system has been developed, taking into account the maximum permissible time of absence of radio communication. An algorithm for the functioning of the optimized IRDP system has been developed.

A model has been developed for determining the maximum permissible time of radio communication absence by the criterion of ensuring the safety of train traffic and the criterion of reducing the throughput of freight and passenger trains.

The modeling of the maximum permissible time of radio communication absence was carried out according to the criterion of ensuring safety and the criterion of reducing the throughput.

An assessment of the adequacy of the model of the maximum permissible time of radio communication absence was carried out according to the criterion of ensuring the safety of the movement of freight and passenger trains based on the Fisher criterion, the proposed model at a confidence level of 0.95 is adequate to the real behavior of the IRDP system.

The software implementation of the functioning of the optimized IRDP system has been developed, and the economic efficiency of the implementation of the optimized IRDP system has been confirmed, based on the reduction in time and energy costs in the absence of radio communication.

Key words: interval regulation, reasons for lack of radio communication, time of absence of radio communication.