

На правах рукописи



Ахмадуллин Фанис Ринатович

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ К ИЗМЕНЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ И ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА**

05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС)».

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор

Леушин Виталий Бениаминович

Официальные оппоненты:

Годяев Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДвГУПС)», кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», заведующий;

Попов Антон Николаевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)», кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)».

Защита состоится «2» марта 2018 г., в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, аудитория Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: www.usurt.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 201_ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основной задачей железнодорожного транспорта является перевозка грузов и пассажиров с максимальной производительностью, минимальной себестоимостью и гарантированной безопасностью движения. Решение этой задачи немислимо без создания и внедрения новой техники и новых технологий, без повышения пропускной способности железных дорог и безопасности движения поездов. Повышение указанных показателей возможно, в частности, посредством совершенствования систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП), в частности рельсовых цепей (РЦ).

Увеличение скорости движения поездов, повышение их массы, а также большое количество климатических зон в РФ значительно усложняют условия работы РЦ.

Анализ статистических данных об отказах в работе устройств СИРДП за 2010-2016 гг., показывает, что на долю РЦ приходится порядка 13% отказов. Одним из негативных влияний, вызывающих отказы в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики, являются дестабилизирующие факторы, в частности, перманентное изменение сопротивления изоляции рельсовой линии (РЛ) РЦ в течение календарного года.

В этой связи одним из направлений совершенствования функционирования устройств СИРДП является разработка РЦ, устойчивость работы которых не будет зависеть от колебаний величины сопротивления изоляции РЛ и от наличия в РЛ помех от тягового тока.

Данное направление соответствует паспорту специальности 05.22.08, в формуле которой указано, что содержанием специальности, в частности, является совершенствование существующих и разработка новых технических и технологических решений в организации, управлении перевозочным процессом, в том числе движением поездов.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в теоретические и прикладные исследования по разработке и проектированию РЦ внесли д.т.н., проф. Брылеев А.М., д.т.н. Беляков И.В., д.т.н., проф. Бестемьянов П.Ф., д.т.н., проф. Лисенков В.М., д.т.н., проф. Кравцов Ю.А., к.т.н., проф. Котляренко Н.Ф., д.т.н., доц. Годяев А.И., к.т.н. Дмитриев В.С., к.т.н., доц. Вековищев А.В. и другие отечественные ученые.

В своих исследованиях автор опирался не только на работы указанных авторов, но и на работы и практические результаты других отечественных и зарубежных ученых и инженеров.

Целью диссертационной работы является разработка и научное обоснование решений, направленных на совершенствование РЦ, способных устойчиво функционировать при изменении сопротивления изоляции РЛ и наличии помех от тягового тока.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Провести анализ особенностей построения РЦ с целью выявления технических решений, позволяющих устойчиво функционировать в условиях изменения сопротивления изоляции РЛ и воздействия помех от тягового тока.

2. Разработать алгоритм функционирования РЦ, устойчивых к изменению сопротивления изоляции РЛ и воздействию помех от тягового тока, и разработать их имитационную модель (ИМ).

3. Выполнить анализ механизма появления помех от тягового тока в РЛ при движении электровозов, установить их параметры и на основе этого разработать ИМ этих помех, позволяющую производить оценку помехоустойчивости каналов с РЛ, в частности путевых приемников (ПП) РЦ.

4. Выполнить исследования разработанного алгоритма функционирования РЦ при изменении сопротивления изоляции РЛ и воздействии помех от тягового тока с целью определения способности РЦ функционировать при изменении сопротивления изоляции РЛ; рабочих диапазонов частот повышенной помехоустойчивостью при необходимой и достаточной мощности путевых генераторов (ПГ), позволяющих повысить надежность РЦ и снизить потребление электроэнергии.

Объектом исследования являются системы интервального регулирования движения поездов с РЦ.

Предметом исследования являются РЦ, устойчиво функционирующие при изменении сопротивления изоляции РЛ и воздействии помех от тягового тока в РЛ.

Научная новизна результатов исследования, полученных автором диссертации, состоит в следующем:

1. Предложен алгоритм функционирования РЦ, устойчивых к изменению сопротивления изоляции РЛ.

2. Доказано, что РЦ, путевые приемники которых обнаруживают сигналы на выходе РЛ посредством разностной аппроксимации, обладают повышенной устойчивостью контроля свободности участков рельсового пути и излома рельсов при изменении сопротивления изоляции РЛ.

3. Установлены параметры флуктуационных и импульсных помех от тягового тока, возникающих в РЛ при движении электровозов.

4. Показано, что разработанная ИМ помех от тягового тока, вызванных некачественным токосъемом и коммутацией тяговых двигателей электровозов, позволяет определять помехоустойчивость ПП РЦ.

5. Доказано, что по критерию помехоустойчивости ПП при необходимой и достаточной мощности ПГ возможно определять рабочие диапазоны частот РЦ, использование которых повышает устойчивость функционирования РЦ в условиях действия помех от тягового тока и снижает уровень потребления электроэнергии.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется следующими полученными результатами:

1. Применение алгоритма функционирования РЦ, устойчивых к изменению сопротивления изоляции РЛ, позволило обосновать повышение устойчивости контроля свободности участков рельсового пути и излома рельсов посредством обнаружения сигналов на выходе РЛ методом разностной аппроксимации.

2. Результаты аналитических исследований, выполненных на основе имитационного моделирования РЦ, в которых для обнаружения сигналов на выходе РЛ применяется метод разностной аппроксимации, показывают, что при эксплуатации РЦ во время изменения сопротивления изоляции РЛ возможен устойчивый контроль свободности участков рельсового пути и излома рельсов.

3. Параметры флуктуационных и импульсных помех от постоянного тягового тока, установленные на основе статистического анализа помех, вызванных некачественным токосъемом и коммутацией тяговых двигателей электровозов, зарегистрированных в реальных условиях эксплуатации.

4. На основе параметров флуктуационных и импульсных помех от постоянного тягового тока, вызванных некачественным токосъемом и коммутацией тяговых двигателей электровозов, разработана ИМ, позволяющая выполнять исследования помехоустойчивости ПП РЦ.

5. В результате проведенных исследований помехоустойчивости ПП при необходимой и достаточной мощности ПГ РЦ установлены рабочие диапазоны частот, в которых РЦ обладают повышенной устойчивостью функционирования к воздействию помех от тягового тока и относительно низким потреблением электроэнергии.

Методология и методы исследований. В соответствии с областью исследований паспорта специальности 05.22.08 п.7 (Системы автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, методы их построения и испытания) при работе над диссертацией автором использованы теория электрических цепей, теория рельсовых цепей, логико-алгоритмический подход, методы имитационного моделирования, теория помехоустойчивости, экспериментальные методы исследования флуктуационных и импульсных помех от тягового тока в РЛ, элементы теории вероятности и математической статистики, теории планирования экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм контроля занятости участков рельсового пути и излома рельсов, обеспечивающий устойчивое функционирование РЦ при изменении сопротивления изоляции РЛ.

2. Имитационные модели, позволяющие анализировать особенности функционирования РЦ, устойчивых к изменению сопротивления изоляции РЛ и воздействию помех от тягового тока.

3. Параметры помех в РЛ от постоянного тягового тока, возникающие при движении электровозов:

- флуктуационные помехи при некачественном токосъеме;
- импульсные помехи при коммутации тяговых двигателей электровоза.

4. Способ имитационного моделирования помех от тягового тока в РЛ, возникающих во время движения электровозов при некачественном токосъеме и коммутации тяговых двигателей.

5. Метод определения рабочих диапазонов частот РЦ по критерию помехоустойчивости ПП при необходимой и достаточной мощности ПГ.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы подтверждается соответствием результатов теоретических исследований и испытаний в лабораторных условиях.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта» (Самара, 2006); Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт, наука, бизнес: проблемы и стратегия развития», посвященной 130-летию Свердловской железной дороги (Екатеринбург, 2008); II Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту», посвященной 110-летию транспортного образования в Саратовской области (Самара – Саратов, 2010); Научно-технической конференции «Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура», посв. 55-летию УрГУПС (Екатеринбург, 2011); VI Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту, приуроченной к 40-летию Самарского государственного университета путей сообщения» (Самара, 2013); I Международной научно-практической конференции «Инновации в системах обеспечения движения поездов» (Самара, 2016); IX Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (Самара, 2016); Международной научно-технической конференции «Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог» (Екатеринбург, 2016), общеуниверситетском семинаре аспирантов УрГУПС (Екатеринбург, 21.12.2016); заседаниях и научных секциях кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» СамГУПС.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационном исследовании результаты используются в разработках ОАО «Бомбардье Транспортейшн Рейл Сигнал», выполняемых в соответствии с планом ОАО «РЖД», акционерным обществом «Научно-производственный центр информационных и транспортных систем» (АО НПЦ ИНФОТРАНС) в разработках по созданию подвижных средств контроля параметров РЦ и сигналов, а также в учебном процессе на кафедре «АТС на железнодорожном транспорте» СамГУПС при разработке курсов «Измерение в устройствах автоматике и телемеханики на ж.-д. тр-те» и «Автоматика и телемеханика на перегонах».

Публикации. По материалам, отражающим основное содержание диссертационной работы, опубликовано 10 печатных работ (из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации научных результатов диссертационных исследований) и получены 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем работы – 162 страницы, в том числе 61 иллюстрация, 13 таблиц, список литературы из 102 наименований, приложения на 30 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации, определены направление и предметная область исследования, сформулированы научная новизна и теоретическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, раскрыта практическая значимость исследований.

В первой главе выполнен системный анализ особенностей построения РЦ, сформулированы задачи исследования.

Установлено, что существующие технические решения по реализации РЦ и используемые в них методы обработки сигналов не позволяют устойчиво контролировать свободу участков рельсового пути и излом рельсов при изменении сопротивления изоляции РЛ и наличии помех от тягового тока. Поэтому для снижения этих влияний, приходится уменьшать длину РЦ и повышать мощность ПГ, что, в свою очередь, требует увеличения количества аппаратуры, расхода кабеля и повышения потребления электроэнергии.

Для уменьшения влияния указанных дестабилизирующих факторов на РЦ, предлагается применять так называемые согласованные РЦ (две смежных РЦ с общим ПГ, подключенным к РЛ на границе их сопряжения). В согласованных РЦ обнаружение и обработка сигналов на выходе РЛ осуществляется посредством разностной аппроксимации (сравнение значений напряжений сигналов с выхода демодуляторов ПП смежных РЦ – получение так называемого согласия). Возможность и эффективность применения этого вида РЦ предложено обосновать при помощи ИМ.

Вторая глава посвящена разработке ИМ РЦ. Предложен алгоритм сравнения значений напряжений сигналов с выхода демодуляторов ПП посредством разностной аппроксимации (рисунок 1).

Решение о свободе рельсового пути и изломе рельсов согласованными РЦ принимается следующим образом: в символах 1 и 2 производится оценка значений напряжений $U_1(t)$ и $U_2(t)$ сигналов на выходе демодуляторов ПП согласованных РЦ, контролирующих первый и второй смежные участки рельсового пути. В символах 3 и 4 производится сравнение значений напряжений $U_1(t)$ и $U_2(t)$ с порогом чувствительности $U_{\text{ПШ}}$ по шунтовому режиму: если каждая из величин $U_1(t)$ и $U_2(t)$ превышает величину $U_{\text{ПШ}}$, то в символе 5 производится сравнение величин $U_1(t)$ и $U_2(t)$ между собой посредством разностной аппроксимации $\Delta_t = U_1(t) - U_2(t)$; если $U_1(t) > U_{\text{ПШ}}$, а $U_2(t) \leq U_{\text{ПШ}}$, то в символе 11 принимается решение о занятом состоянии второго участков рельсового пути ($P_1 = 0$; $P_2 = 1$). В символе 6 принимается решение по управлению процессами в символах 7 и 8, производя сравнение величин Δ_t и $\Delta_{t\text{доп}}$ (предельное значение Δ_t по верхней границе): если $\Delta_t < \Delta_{t\text{доп}}$, то в символе 7 принимается решение о свободном состоянии обоих контролируемых участков рельсового пути ($P_1 = P_2 = 0$), а если $\Delta_t \geq \Delta_{t\text{доп}}$, то в символе 8 принимается решение о занятом состоянии обоих контролируемых участков рельсового пути ($P_1 = P_2 = 1$). В символе 9 принимается решение по управлению про-

цессами в символах 8 и 10: если $U_2(t) \leq U_{\text{ПШ}}$, то в символе 8 принимается решение о занятом состоянии обоих контролируемых участков рельсового пути ($P_1 = P_2 = 1$), а если $U_2(t) > U_{\text{ПШ}}$, то в символе 10 принимается решение о свободном состоянии второго участка рельсового пути и занятом состоянии первого участка.

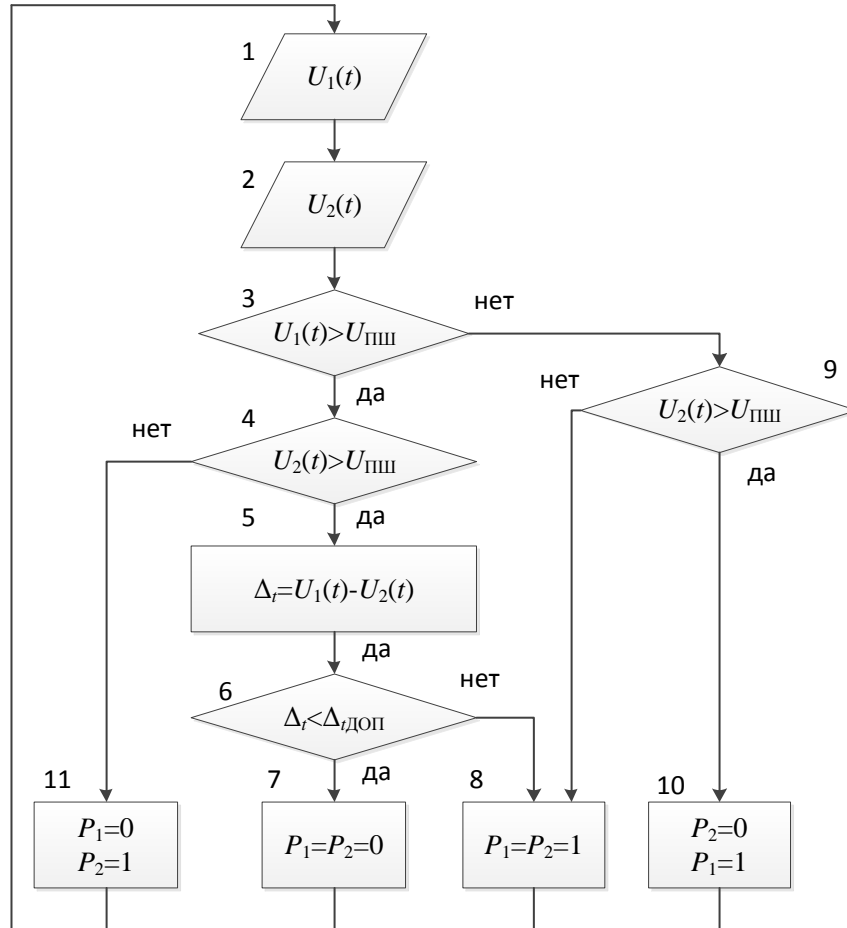


Рисунок 1 – Алгоритм сравнения $U_1(t)$ и $U_2(t)$

На основании предложенного алгоритма сформулированы общие требования к ИМ согласованных РЦ, разработка которых осуществлена в среде *Simulink* пакета *MATLAB*.

В теории рельсовых цепей условия распространения электромагнитной волны вдоль РЛ осуществляются на основе анализа связи между напряжением и током в начале (\dot{U}_H и \dot{I}_H) и напряжением и током в конце (\dot{U}_K и \dot{I}_K) РЛ.

Функционирование ИМ, разработанной в диссертации, основано на обратной зависимости между напряжением и током в конце (\dot{U}_K и \dot{I}_K) и напряжением и током в начале (\dot{U}_H и \dot{I}_H) РЛ соответственно:

$$\dot{U}_K = \dot{U}_H(\text{sh}\gamma l - \text{ch}\gamma l); \quad (1)$$

$$\dot{I}_K = \dot{U}_H \frac{1}{Z_B} (\text{ch}\gamma l - \text{sh}\gamma l), \quad (2)$$

где γ – коэффициент распространения волны, 1/км; Z_B – волновое сопротивление, Ом; l – длина РЛ, км.

В диссертации произведено исследование РЦ с амплитудно-манипулированным (АМ) сигналом и сигналом с двойной фазоразностной манипуляцией (ФРМ-2).

В основу ИМ ПГ АМ-сигнала положено математическое представление амплитудно-манипулированного колебания:

$$U_c(\lambda, t) = \lambda(t)U_{0c} \sin(\omega_c t + \varphi_c), \quad (3)$$

где U_{0c} – амплитуда немодулированного колебания; $\lambda(t)$ – нормированный информационный процесс; ω_c – круговая частота несущей сигнала; φ_c – начальная фаза несущей сигнала.

ИМ ПГ сигналов с ФРМ-2 реализует алгоритм работы передающей и приемной аппаратуры каналов с ФРМ K -го порядка.

Конечная разность функции $\Delta_n^K \gamma$ (γ – фаза несущей сигнала) – конечная разность функции времени $i(t)$, выраженная через ее отсчеты в моменты t_1, t_2, \dots, t_n , имеет два индекса: верхний, указывающий порядок конечной разности, и нижний, указывающий номер разности, соответствующий ее положению во времени.

Разность фазы несущей сигнала γ_n может быть вычислена непосредственно через отсчеты функции

$$\gamma_n = \Delta_n^K \gamma - \sum_{i=0}^{K-1} (-1)^{K-i} C_K^i \gamma_{n-K+i}, \quad (4)$$

где C_K^i – число сочетаний из K по i .

Представленное соотношение определяет алгоритм работы передающей и приемной аппаратуры каналов с ФРМ K -го порядка.

В данной работе разработаны ИМ ПГ и ПП сигналов с ФРМ-2, в которых организованы два независимых фазовых подканала: синхрогрупп (СГ) и кодовых комбинаций (КК).

При разработке ИМ ПП согласованных РЦ предварительно был выполнен анализ существующих способов защиты от воздействия аддитивных помех в РЛ.

Рабочие диапазоны частот РЦ располагаются между гармониками кратными частоте промышленного тока и поэтому ИМ ПП проектируется с учетом эффективной полосы частот $\Delta f_{\text{Э}}$ по входу ПП, диапазон которой можно установить на основе выражения

$$\eta = \frac{R}{\Delta f_{\text{Э}}}, \quad (5)$$

где R – скорость передачи информации, дв. ед./с; $\Delta f_{\text{Э}}$ – эффективная полоса частот по входу приёмника, Гц.

Анализ методов защиты от аддитивных импульсных помех показывает, что для подавления импульсных помех в реальных ПП АМ-сигнала широко применяется схема

«широкая полоса – ограничение – узкая полоса» (ШОУ), реализующая нелинейную преддетекторную обработку сигналов с высокой эффективностью.

При приеме АМ-сигнала узкополосный фильтр на выходе схемы ШОУ, если он согласован со спектром полезного сигнала, значительно повышает отношение сигнал/помеха. Поэтому отношение сигнал/помеха будут определяться главным образом эффективной полосой пропускания узкополосного фильтра $\Delta f_{\text{ЭУ}}$ на выходе схемы

$$\left(\frac{С}{П}\right)_{\text{ШОУ}} = \frac{\Delta f_{\text{ЭШ}}}{b\Delta f_{\text{ЭУ}}} = \frac{\tau}{\Delta t}, \quad (6)$$

где $b = \ln 2 \frac{S_0 \Delta f_{\text{ЭШ}}}{U_0}$; $\Delta f_{\text{ЭШ}}$ – эффективная полоса пропускания широкополосного фильтра на входе ограничителя схемы ШОУ; $\Delta f_{\text{ЭУ}}$ – эффективная полоса пропускания узкополосного фильтра; S_0 – спектральная плотность помехи; τ – длительность элементарного символа сигнала; Δt – длительность импульсной помехи.

Помехоустойчивость приёмников ФРМ-2-сигналов со схемами ШОУ значительно выше приёмников АМ-сигналов и ЧМ-сигналов и поэтому в ИМ ПП сигнала с ФРМ-2 схема ШОУ не применялась.

На рисунке 2 представлена блок-схема ИМ согласованных РЦ, разработанная в *Simulink*: 1 – задание параметров РЛ; 2 – ПГ РЦ; 3 – источник помех; 4 – РЛ первой РЦ; 5 – РЛ второй РЦ; 6 – блок расчета затухания в РЛ; 7 – ПП первой РЦ; 8 – ПП второй РЦ; 9 – блок вычисления ошибок приема; 10 и 11 – сумматоры; 12 – устройство принятия решения (см. рисунок 1); 13 – линия задержки; 14, 15, 16, 17 и 18 – виртуальные осциллографы; 19, 20, 21, 22 – дисплеи, отражающие затухание в РЛ, количество ошибок вида «пропуск цели», «ложная цель» и общее количества ошибок соответственно.

Решение задачи по определению оптимальных рабочих диапазонов частот согласованной РЦ по критерию помехоустойчивости при необходимой и достаточной мощности ПГ предложено осуществить с помощью программы «*RELS*», разработанной на кафедре «АТС на ж.-д. транспорте» СамГУПС.

Третья глава посвящена имитационному моделированию помех от тягового тока.

Разработка ИМ помех в РЛ от тягового тока, реализованная в среде *Simulink* пакета *MATLAB*, основана на базе параметров помех, полученных в результате регистрации на участках Московской и Куйбышевской железных дорог при движении локомотивов серии ВЛ-10^У, ведущих составы массой от 1 тыс. до 5 тыс. т. по методике, разработанной на кафедре «АТС на ж.-д. транспорте» СамГУПС.

Импульсные помехи возникают в моменты переключения схем управления тяговыми двигателями электровоза и следуют пачками, поэтому ИМ импульсных помех должна формировать пачки импульсных помех в моменты времени, соответствующие конкретной коммутации тяговых электродвигателей.

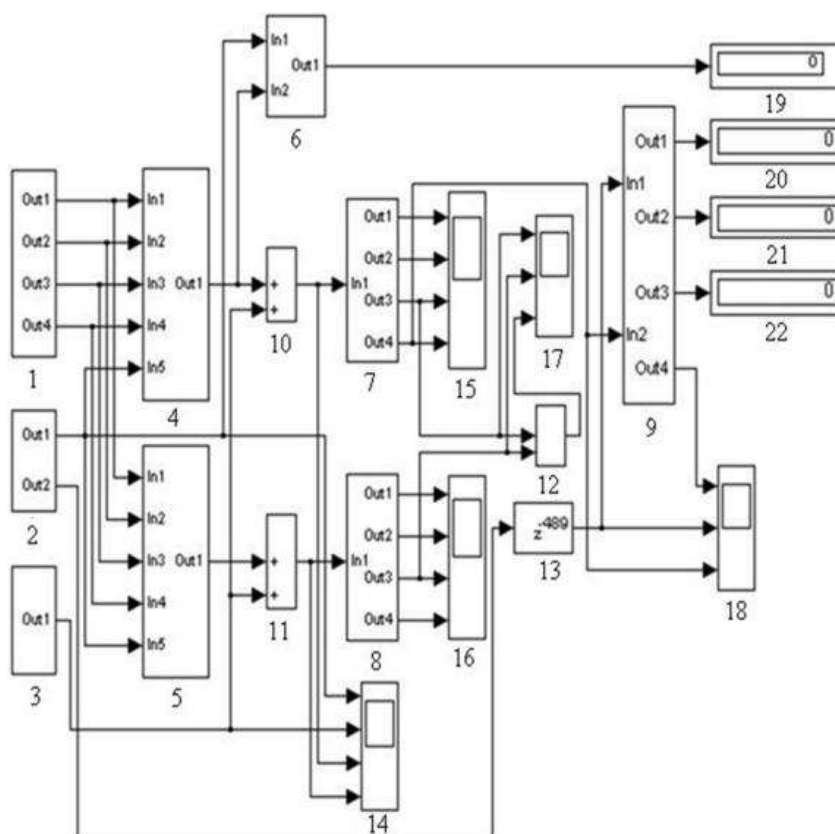


Рисунок 2 – Блок-схема ИМ согласованных РЦ в *Simulink*

Генерация пачек импульсов в моменты переключений контроллера машиниста в данном исследовании реализована с учетом следующих параметров: вид переключения контроллером схем управления тяговыми двигателями; количество импульсов $N_{им}$ в пачке; длительность импульсов $t_{имi}$, соответствующих i -му состоянию импульсной помехи; длительность последующих межимпульсных интервалов $t_{имi}$, соответствующих i -му состоянию импульсной помехи.

Учитывая, что для исследования параметров импульсных помех от постоянного тягового тока применение теоретических исследований затруднительно, в данной работе для получения данных о параметрах помех, позволяющих создать их ИМ, применены регистрация реальных помех, обработка и анализ полученных данных (амплитуда и длительность импульсов, длительность межимпульсных интервалов и т. д.).

При разработке ИМ импульсных помех от постоянного тягового тока применена марковская модель, в основу которой положены следующие параметры: длительности импульсов, межимпульсных интервалов и амплитуда импульсов.

Для каждой из записанных реализаций определялся выборочный эксцесс распределения мгновенного значения помехи согласно выражению:

$$\bar{e}_{u_{ип}} = \frac{1}{(n-1)\bar{D}_{u_{ип}}^2} \sum_{i=1}^n (u_{ипi} - \bar{u}_{ип})^4 - 3, \quad (7)$$

где $\bar{u}_{\text{ип}}$ – выборочное среднее; $\bar{D}_{u_{\text{ип}}}$ – выборочная дисперсия; n – количество отсчетов в реализации.

Установлено, что эксцесс меняется в зависимости от условий движения от $-2,7$ до $153,8$. Для измеренных значений длительностей импульсов помехи определены выборочные среднее $\bar{\tau}_{\text{им}}$, дисперсия $\bar{D}_{\tau_{\text{им}}}$, среднеквадратичное отклонение $\bar{\sigma}_{\tau_{\text{им}}}$, асимметрия $\bar{a}_{\tau_{\text{им}}}$ и эксцесс $\bar{e}_{\tau_{\text{им}}}$, которые составили соответственно: $\bar{\tau}_{\text{им}} = 3,5$ мс; $\bar{D}_{\tau_{\text{им}}} = 17,0$ мс²; $\bar{\sigma}_{\tau_{\text{им}}} = 4,1$ мс; $\bar{a}_{\tau_{\text{им}}} = 3,4$; $\bar{e}_{\tau_{\text{им}}} = 23,1$.

Накопленные экспериментальные данные позволили подобрать теоретическое распределение, которое подчиняется экспоненциальному закону

$$w_{\text{им}} = \lambda e^{-\lambda n} \quad (8)$$

с параметром $\lambda = \frac{1}{\tau_{\text{им}}} = 248,1$.

Таким же образом для длительностей межимпульсных интервалов определены выборочные среднее, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, асимметрия и эксцесс: $\bar{\tau}_{\text{ин}} = 171,7$ мс; $\bar{D}_{\tau_{\text{ин}}} = 0,2$ с²; $\bar{\sigma}_{\tau_{\text{ин}}} = 0,4$ с; $\bar{a}_{\tau_{\text{ин}}} = 4,106$; $\bar{e}_{\tau_{\text{ин}}} = 18,9$.

По накопленным экспериментальным данным было подобрано теоретическое распределение, подчиняющееся закону гамма-распределения

$$w_{\text{ин}}(n) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} n^{a-1} e^{-bn} \quad (9)$$

с параметрами $a = 0,011$ и $b = 1,22$.

Для величин амплитуд импульсов $w(U_{\text{им}})$ определены выборочные среднее, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, асимметрия и эксцесс: $\bar{U}_{\text{им}} = -3,0$ В; $\bar{D}_{U_{\text{им}}} = 108,1$ В²; $\bar{\sigma}_{U_{\text{им}}} = 10,4$ В; $\bar{a}_{U_{\text{им}}} = 2,2$; $\bar{e}_{U_{\text{им}}} = 8,1$.

Анализ временных реализаций импульсных помех позволяет предположить, что существуют вероятностные связи в пачке между амплитудами следующих друг за другом импульсов, а также между амплитудами импульсов и длительностями импульсов и межимпульсных интервалов. Так, например, можно выделить области часто встречающихся значений амплитуд и разделить ее на N подобластей соответственно, и поэтому импульсную помеху можно представить как систему с N дискретными состояниями, где каждому из состояний соответствует наличие импульса, амплитуда которого попадает в ту или иную подобласть.

Последовательность переходов системы из одного состояния в другое в первом приближении может быть представлена однородной односвязной марковской цепью, дискретной по состояниям и по времени. В данном исследовании в качестве параметров, характеризующих n -е состояние, приняты амплитуда импульса $U_{\text{им}n}$, его длительность $\tau_{\text{им}n}$ и длительность интервала $\tau_{\text{ин}n}$, следующего за данным импульсом.

Марковская цепь характеризуется вектором начальных состояний \mathbf{P}_0 и матрицей перехода \mathbf{P} , имеющими следующий вид:

$$\mathbf{P}_0 = (p_1^{(0)} \ p_2^{(0)} \ \dots \ p_N^{(0)}); \quad (10)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $p_i^{(0)}$ – безусловная вероятность нахождения системы в i -м начальном состоянии; p_{ij} – условные вероятности перехода системы из i -го состояния в j -е (для однородной цепи Маркова вероятности p_{ij} не зависят от времени). В данном случае область значений амплитуд импульсов можно разбить на $N = 5$ подобластей – система будет иметь пять состояний, в каждом из которых определены средние значения амплитуд импульсов $\bar{U}_{имп}$, длительностей импульсов $\tau_{имп}$ и длительностей интервалов $\tau_{инт}$, следующих за импульсами.

Средняя длительность импульсов составляет порядка нескольких миллисекунд и связана прямо пропорционально с амплитудой.

Анализ экспериментально полученных реализаций импульсной помехи показывает, что вектор начальных состояний системы \mathbf{P}_0 и матрица перехода \mathbf{P} имеют вид:

$$\mathbf{P}_0 = (0,13 \quad 0,36 \quad 0,10 \quad 0,30 \quad 0,11); \quad (12)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0,43 & 0,19 & 0,06 & 0,26 & 0,06 \\ 0,22 & 0,36 & 0,04 & 0,30 & 0,08 \\ 0,14 & 0,02 & 0,09 & 0,54 & 0,21 \\ 0,14 & 0,18 & 0,11 & 0,46 & 0,11 \\ 0,14 & 0,16 & 0,06 & 0,37 & 0,27 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Приведенные данные полностью задают характеристики простой марковской цепи, а описанная выше система позволяет сформировать ИМ импульсной помехи на фоне флуктуационных помех, посредством которой возможно реализовать эксперименты по исследованию помехоустойчивости ПП РЦ в условиях, приближенных к реальным условиям.

На рисунке 3 отображены осциллограммы сигналов, поясняющие процесс функционирования ИМ, формирующей импульсные помехи на фоне флуктуационных помех.

В четвертой главе представлены результаты исследований особенностей функционирования согласованных РЦ в различных условиях эксплуатации: возможности контролировать состояние участков рельсового пути при изменении сопротивления изоляции РЛ; помехоустойчивости ПП и зависимости предельной длины РЛ от частоты несущей сигнала.

На рисунках 4-6 представлены осциллограммы на выходе устройств ИМ (рисунок 2), поясняющие особенности функционирования согласованных РЦ при движении поезда по контролируемым участкам рельсового пути.

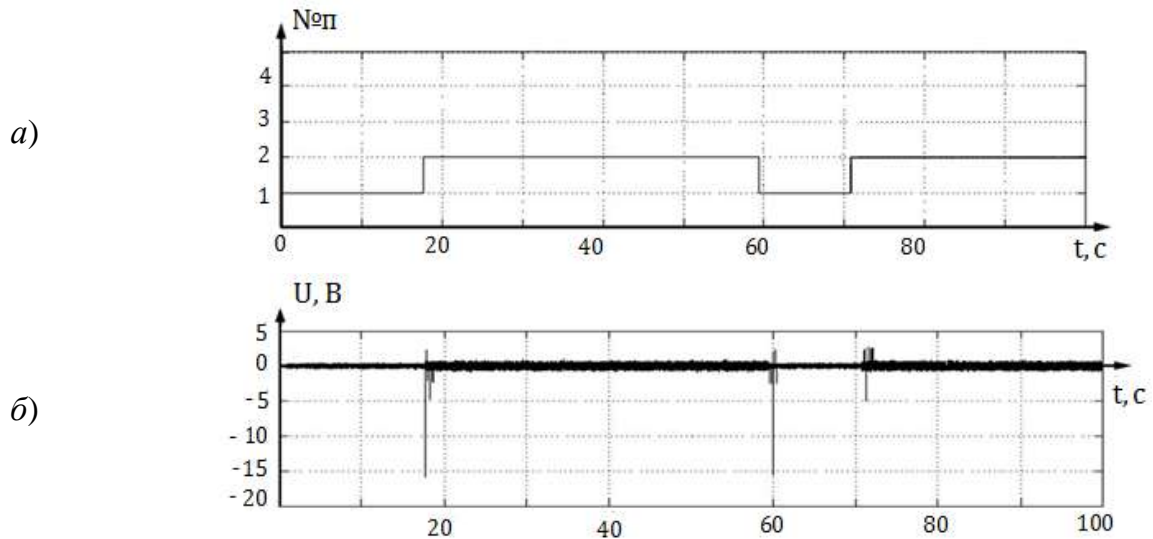


Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов: *а* – номер позиции контроллера машиниста (0-С-0-С);
б – модель помехи

На рисунках 4 и 5 – процесс функционирования при изменении во времени сопротивления изоляции $Z_{И}$ РЛ (участки свободны, рельсы не изломаны). На рисунке 5 – показано следующее: если уровень напряжения на выходе демодуляторов ПП РЦ уменьшится до величины ниже $U_{ПШ}$, то фиксируется занятость участка рельсового пути (участок пути ложно занят). На рисунке 6 – представлен процесс контроля свободного состояния участков рельсового пути при изменении $Z_{И}$ РЛ посредством разностной аппроксимации (участки свободны, рельсы не изломаны), логический сигнал равен Δ_t (на графике равен нулю).

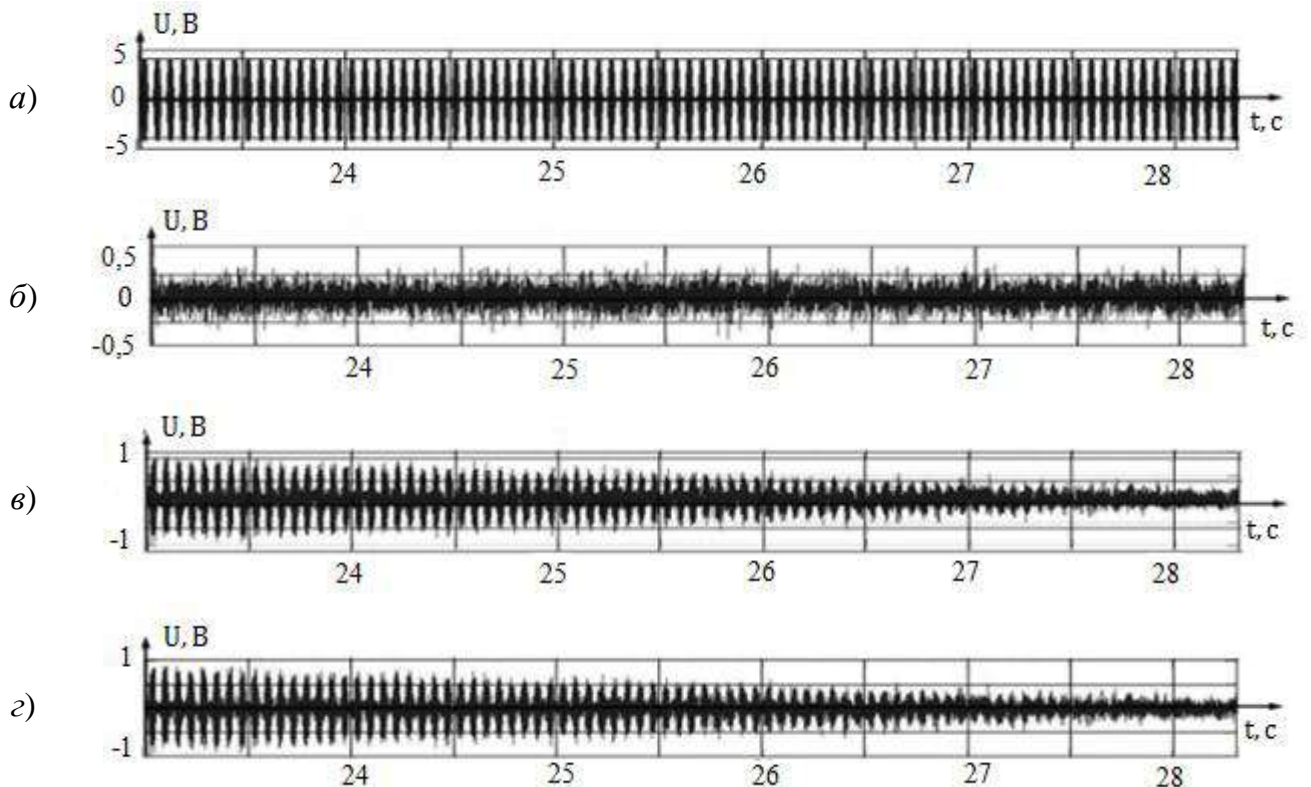


Рисунок 4 – Осциллограмма сигналов на выходе устройств имитационной модели: *а* – ПГ; *б* – флуктуационная помеха на выходе генератора помех; *в* – первой РЛ; *г* – второй РЛ

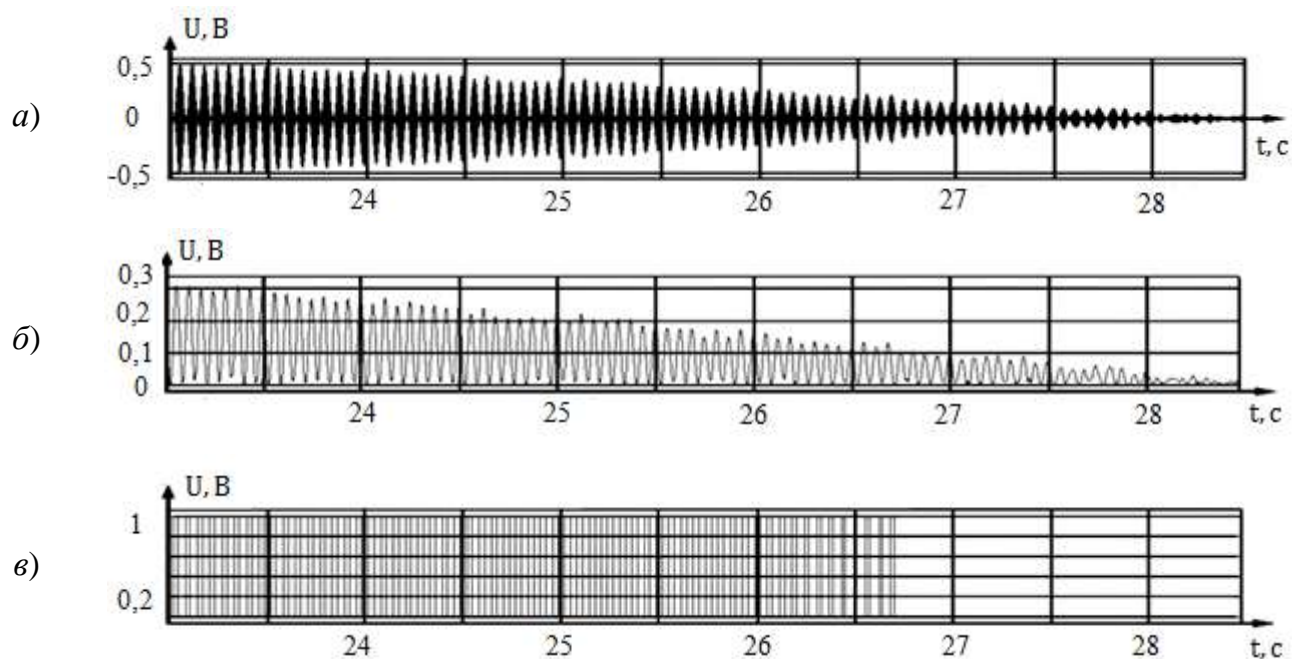


Рисунок 5 – Осциллограмма сигналов на выходе устройств ИМ ПП РЦ: *а* – входного полосового фильтра; *б* – демодулятора; *в* – первого РУ

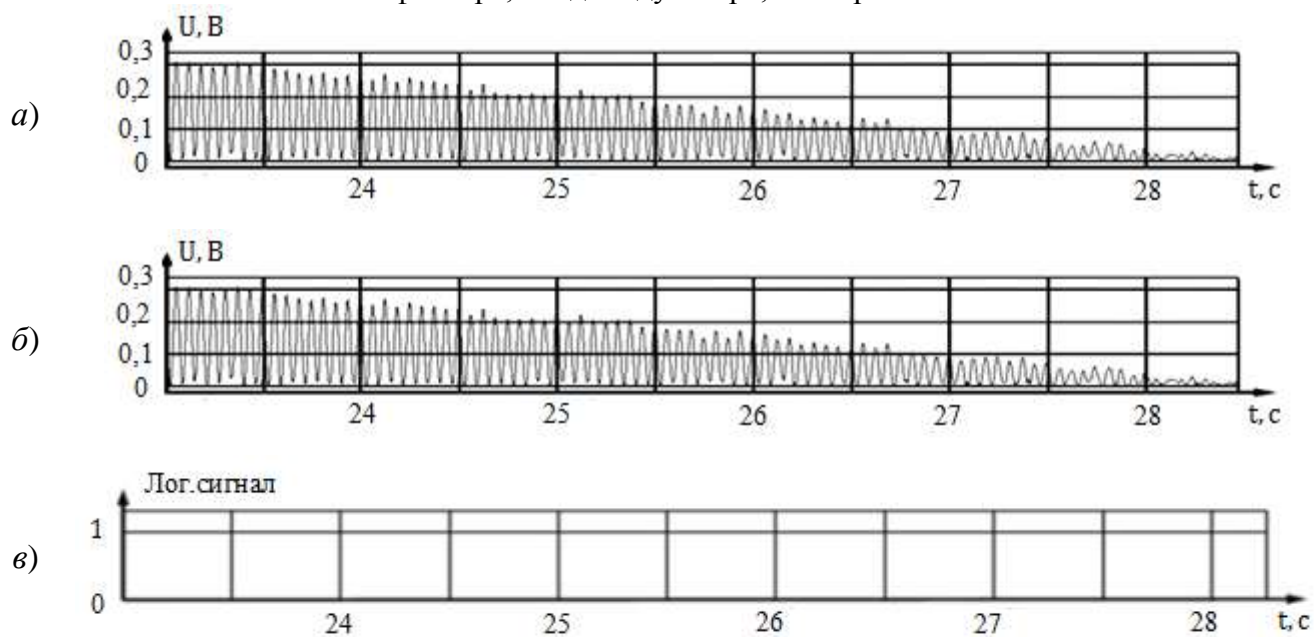


Рисунок 6 – Осциллограммы сигналов на выходе устройств ИМ: *а* и *б* – демодуляторов ПП первой и второй РЦ соответственно, *в* – устройства сравнения значений величин U_1 и U_2

Осциллограммы на рисунке 7 отображают процесс контроля проезда подвижной единицей по участкам рельсового пути.

В качестве критерия помехоустойчивости ПП АМ-сигналов принята средняя вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$, относящаяся к элементарному символу, а для ПП сигнала с ФРМ-2 – вероятность возникновения ошибки в подканале КК.

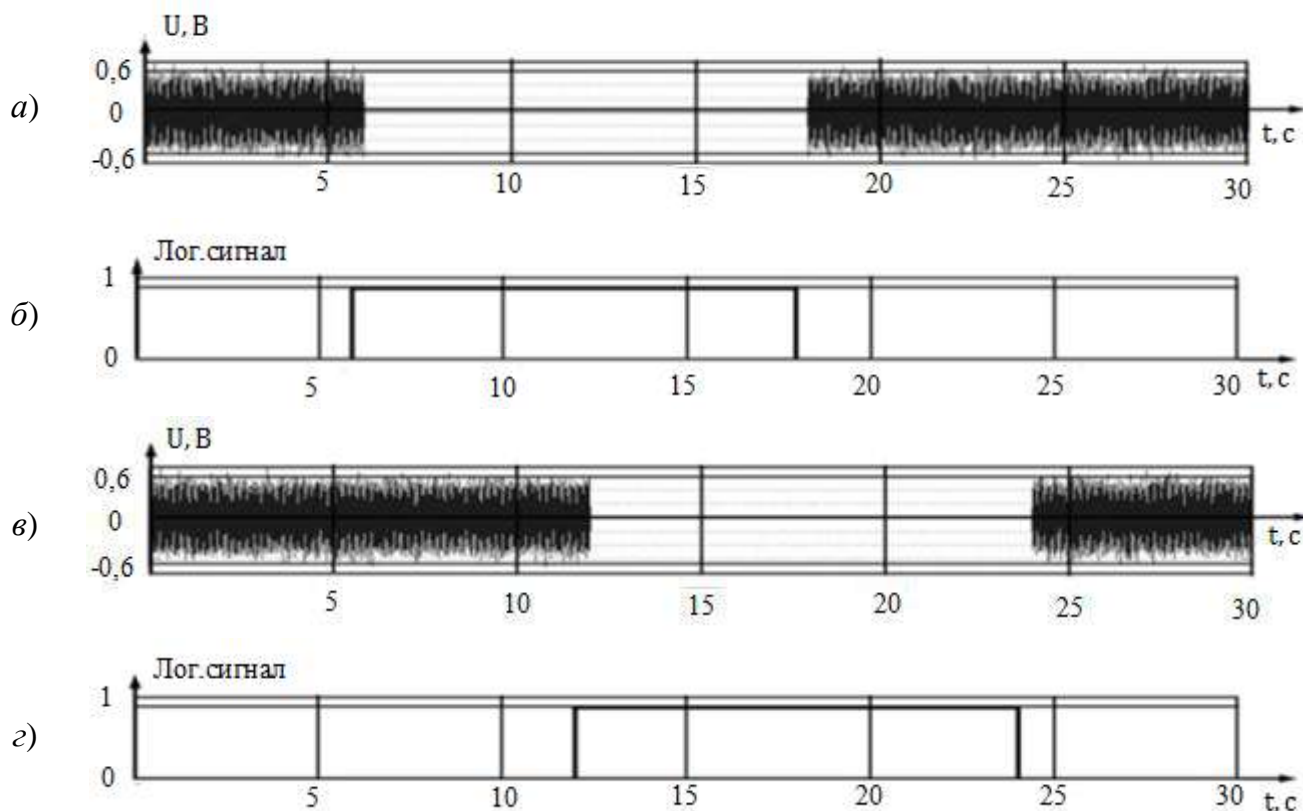


Рисунок 7 – Графики, представляющие процесс проследования поезда по контролируемым участкам пути: *а* и *в* – сигналы на выходе первой и второй РЛ соответственно; *б* и *г* – логические сигналы, демонстрирующие проезд поезда по первому и второму участкам пути соответственно

В таблице 1 представлены зависимости помехоустойчивости ПП АМ-сигнала, сигнала с ФРМ-2 и максимальной длины $l_{рл}$ РЛ ($Z_{и} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{км}$) от частоты несущей сигнала. Представленные данные показывают, что ПП АМ-сигнала и сигналов с ФРМ-2 в рабочих диапазонах со средними частотами полосы пропускания 325, 375, 425, 475, 525 и 575 Гц и выше обладают относительно высокой помехоустойчивостью.

По критерию помехоустойчивости при необходимой и достаточной мощности ПГ, которая определяется на основании анализа зависимости максимальной длины РЛ от частоты несущей сигнала при номинальном значении сопротивления изоляции РЛ – $Z_{и} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ (таблица 1), установлено, что при частотном способе электромагнитной совместимости (ЭМС) РЦ рабочие диапазоны со средней частотой полосы пропускания 325, 375, 425, 475, 525 и 575 Гц позволяют не только повысить устойчивость функционирования РЦ, но и снизить потребление РЦ электрической энергии.

Применение частотного способа защиты РЦ совместно с кодовым для обеспечения ЭМС позволяет уменьшить количество рабочих диапазонов частот до одного – 375 Гц.

Таблица 1 – Зависимость $P_{\text{ош}}$ и $l_{\text{рл}}$ ($Z_{\text{и}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{км}$) от $f_{\text{н}}$ сигнала

| № п/п | Частота несущей сигнала $f_{\text{н}}$, Гц | Средняя вероятность ошибки $\bar{P}_{\text{ош}}$ | | Длина РЛ $l_{\text{рл}}$, км |
|-------|---|--|----------------|-------------------------------|
| | | ПП | | |
| | | АМ-сигнал | сигнал с ФРМ-2 | |
| 1 | 75 | 0,184 | 0,0189 | - |
| 2 | 125 | 0,211 | 0,225 | - |
| 3 | 175 | 0,193 | 0,234 | - |
| 4 | 225 | 0,143 | 0,222 | 2,35 |
| 5 | 275 | 0,086 | 0,152 | 2,22 |
| 6 | 325 | 0,058 | 0,099 | 2,16 |
| 7 | 375 | 0,049 | 0,105 | 1,87 |
| 8 | 425 | 0,055 | 0,166 | 1,82 |
| 9 | 475 | 0,052 | 0,101 | 1,65 |
| 10 | 525 | 0,052 | 0,093 | 1,55 |
| 11 | 575 | 0,047 | 0,058 | 1,48 |
| 12 | 625 | 0,038 | 0,056 | 1,4 |
| 13 | 675 | 0,040 | 0,048 | 1,32 |
| 14 | 725 | 0,036 | 0,031 | 1,26 |
| 15 | 775 | 0,031 | 0,025 | 1,2 |
| 16 | 825 | 0,020 | 0,006 | 1,13 |
| 17 | 875 | 0,009 | 0,002 | 1,08 |
| 18 | 925 | 0,006 | <0,001 | 1,04 |
| 19 | 975 | 0,004 | <0,001 | 1,0 |

Таким образом, при совершенствовании существующих и разработке новых РЦ, в зависимости от применяемых способов защиты для обеспечения ЭМС, необходимо применять указанные выше рабочие диапазоны частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ особенностей применения, построения и тенденций по совершенствованию РЦ и статистики их отказов, показывающий необходимость в дальнейшем проведении научно-исследовательских работ по совершенствованию устройств контроля свободности участков рельсового пути и излома рельсов с целью повышения их устойчивости.

2. Определены основные направления исследований по разработке и реализации согласованных РЦ, устойчиво функционирующих при изменении сопротивления изоляции РЛ в условиях действия помех от тягового тока.

3. Разработана методика аналитических исследований согласованных РЦ с целью: анализа особенности функционирования РЦ при изменении сопротивления изоляции РЛ; оценки помехоустойчивости ПП; определения рабочих диапазонов частот по критерию максимальной помехоустойчивости ПП и минимальной достаточной мощности ПГ.

4. Разработана алгоритмическая реализация согласованных РЦ, устойчиво функционирующих при изменении сопротивления изоляции РЛ.

5. Разработана ИМ согласованных РЦ, позволяющая выполнять исследования особенности их функционирования при изменении сопротивления изоляции РЛ.

6. Выполнен анализ механизма появления помех от постоянного тягового тока в РЛ при движении электровозов.

7. Разработана ИМ помех от тягового тока, возникающих во время движения электровоза при некачественном токосъеме и переключении схем управления тяговыми двигателями электровоза, позволяющая производить исследования помехоустойчивости приемников каналов с РЛ.

8. Проведены исследования особенностей функционирования согласованных РЦ, в результате которых установлено следующее:

– способность устойчиво контролировать согласованными РЦ занятость (свободность) участков рельсового пути и излом рельсов при изменении сопротивления изоляции РЛ;

– рабочие диапазоны частот, позволяющие РЦ функционировать с максимальным уровнем помехоустойчивости ПП при минимальной достаточной мощности ПГ.

9. Полученные в данной работе результаты позволяют выработать рекомендации по разработке новых и совершенствованию существующих РЦ, обладающих повышенной устойчивостью в условиях изменения сопротивления изоляции РЛ и воздействия помех от тягового тока.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

а) в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Ахмадуллин, Ф. Р. Несопряженные соотносительные рельсовые цепи [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин // Транспорт Урала. – 2008. – № 4 (19). – С. 67-69.

2. Ахмадуллин, Ф. Р. К вопросу о машинном моделировании адаптивных рельсовых цепей [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 3 (39). – С. 24-28.

3. Ахмадуллин, Ф. Р. Метод исследования параметров помех в рельсовой и индуктивно-рельсовой линиях [Текст] / В. Б. Леушин, Г. А. Черезов, Ф. Р. Ахмадуллин // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6 (60). – С. 62-65.

4. Ахмадуллин, Ф. Р. Об одном методе определения области номинальной работы рельсовых цепей [Текст] / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, Ф. Р. Ахмадуллин // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 3 (63). – С. 64-68.

б) патенты и свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ

5. Пат. 162681 Российская Федерация, МПК В 61 L 23/16. Устройство для изменения параметров сигналов в рельсовых цепях / В. Б. Леушин, Г. А. Черезов, Ф. Р. Ах-

мадуллин; заявка №2015141237/11; заявл. 28.09.15; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18, Приоритет 28.09.15, (РФ).

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017614973. Имитационная модель установки для оценки помехоустойчивости канала с индуктивно-рельсовой линией в зависимости от частоты несущей сигнала / Ахмадуллин Ф. Р., Леушин В. Б., Жилиева С. Н. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.05.2017 г.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2017617846. Имитационная модель помех в рельсовых и индуктивно-рельсовых линиях от постоянного тягового тока / Ахмадуллин Ф. Р., Юсупов Р. Р., Леушин В. Б. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.07.2017 г.

в) в других изданиях

8. Ахмадуллин, Ф. Р. Модели рельсовой линии для рельсовых цепей с адаптивным приемником [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). – Самара : СГАУ, 2010. – С. 202-208.

9. Ахмадуллин, Ф. Р. Метод контроля состояния рельсовой линии [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту», посвященной 110-летию транспортного образования в Саратовской области (Самара – Саратов, 2010 г.). – Самара : СамГУПС, 2010. – С. 73-76.

10. Ахмадуллин, Ф. Р. К вопросу о моделировании импульсных помех от постоянного тягового тока в рельсовых линиях [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин, В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов // Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск : ОмГУПС, 2015 г. – С. 47-51.

11. Ахмадуллин, Ф. Р. К вопросу об исследовании возможности применения надтонального диапазона частот для рельсовых цепей [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин, В. Б. Леушин, Л. Б. Смирнова, // Инновации в системах обеспечения движения поездов: Материалы I Международной научно-практической конференции (19-20 мая 2016). – Самара : СамГУПС, 2016 г. – С. 32-34.

12. Ахмадуллин, Ф. Р. К вопросу об анализе помехоустойчивости каналов с рельсовыми и индуктивно-рельсовыми линиями [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин, В. Б. Леушин // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : материалы Международной научно-технической конференции (16-17 ноября 2016). – Екатеринбург : УрГУПС, 2016 г. – С. 128-133.

13. Ахмадуллин, Ф. Р. Имитационная модель помех в рельсовых и индуктивно-рельсовых линиях при электротяге постоянного тока [Текст] / Ф. Р. Ахмадуллин, В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 4 (64). – С. 42-45.

Основные положения и результаты исследований автором получены самостоятельно. Статьи [1, 2, 8, 9] подготовлены единолично. Личный вклад автора в научных работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [3] – произведена регистрация и последующая обработка помех от тягового тока; [4] – определена область номинальной работы рельсовой цепи, границами которой являются длина рельсовой линии и сопротивление изоляции рельсовой линии; [5] – разработан вычислительный блок; [6] – разработана имитационная модель установки для оценки помехоустойчивости канала с индуктивно-рельсовой линией; [7] – разработана имитационная модель флуктуационных и импульсных помех в рельсовых и индуктивно-рельсовых линиях от постоянного тягового тока; [10] – произведен анализ статистических данных импульсных помех; [11] – получены зависимости величины напряжения сигнального тока на приёмном конце рельсовой цепи от ординаты расположения нормативного шунта и зависимости величины напряжения контрольного сигнала от его частоты при наложении на рельсовую линию нормативного шунта; [12] – разработана структурная схема машинной модели; [13] – разработаны блоки имитационной модели, позволяющие учитывать два вида помех (флуктуационных и импульсных) – как в совокупности, так и по отдельности.

Ахмадуллин Фанис Ринатович

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ К ИЗМЕНЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ И ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА**

05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

Подписано в печать «___» _____ 2017

Формат 60 × 84 1/16
Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,3
Заказ 300.

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66