

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Приволжский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО ПривГУПС)

*На правах рукописи*



**Хохрин Алексей Сергеевич**

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ ПРИЕМНИК ДЛЯ КАНАЛА  
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ  
НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА**

2.9.4. Управление процессами перевозок  
(технические науки)

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Юсупов Руслан Рифович

Самара – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА АЛСН.....	12
1.1 Анализ сбоев в работе АЛСН на железной дороге.....	13
1.2 Методы и технические решения по повышению помехоустойчивости локомотивного приемника канала АЛСН .....	28
1.3 Анализ процесса распространения сигнала АЛСН по рельсовой линии .....	36
1.4 Выводы по первой главе.....	48
2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ АЛСН.....	50
2.1 Потенциальные возможности оптимального приема сигналов АЛСН .....	50
2.2 Методы нелинейной обработки сигналов в канале АЛСН.....	62
2.2.1 Оценка эффективности нелинейных подавителей импульсной помехи.....	62
2.2.2 Способ подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования.....	66
2.2.3 Методика определения порога амплитудного ограничения или бланкирования импульсной помехи.....	68
2.2.4 Анализ эффективности нелинейного подавления гармонических помех от высоковольтных ЛЭП .....	75
2.3 Разработка алгоритма функционирования квадратурного приемника с нелинейными преобразованиями сигнала .....	79
2.4 Выводы по второй главе.....	84
3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ АЛСН.....	86
3.1 Разработка имитационных моделей приемников сигналов АЛСН .....	86
3.2 Исследование процесса функционирования приемников в номинальных условиях эксплуатации.....	93

3.2.1 Оценка пороговой чувствительности квадратурных приемников.....	94
3.2.2 Оценка устойчивости функционирования квадратурных приемников при нестабильности частоты несущего колебания .....	95
3.3 Сравнительная экспериментальная оценка помехоустойчивости и безопасности функционирования приемников при воздействии помех .....	101
3.3.1 Цель и задачи исследования .....	101
3.3.2 Методики проведения экспериментов при воздействии флюктуационной и импульсной помехи .....	102
3.3.3 Методика проведения эксперимента при воздействии гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП .....	107
3.3.4 Помехоустойчивость и безопасность функционирования приемников в условиях воздействия аддитивной флюктуационной помехи.....	112
3.3.5 Помехоустойчивость и безопасность функционирования приемников в условиях воздействия аддитивной импульсной помехи.....	117
3.3.6 Исследование помехоустойчивости квадратурных приемников в условиях воздействия гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП .....	121
3.4 Выбор квадратурного приемника сигналов АЛСН .....	122
3.5 Выводы по третьей главе .....	124
<b>4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КВАДРАТУРНОГО ПРИЕМНИКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПОДАВИТЕЛЯМИ ПОМЕХ .....</b>	<b>127</b>
4.1 Техническая реализация экспериментального образца приемника.....	127
4.2 Разработка методики и стенда для экспериментальной сравнительной оценки помехоустойчивости локомотивных приемников .....	130
4.3 Анализ результатов эксперимента .....	136
4.4 Выводы по четвертой главе .....	147
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>149</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>152</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>156</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....</b>	<b>172</b>

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 .....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 .....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 .....	200

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Стратегия развития железнодорожного транспорта до 2030 г., утвержденная Правительством РФ от 17.06.2008 г. № 877-р, предполагает развитие тяжеловесного движения и увеличение скоростей движения поездов, обуславливающие внедрение нового тягового подвижного состава повышенной мощности. При этом повышается интенсивность воздействия дестабилизирующих факторов на железнодорожную инфраструктуру, в частности, на системы интервального управления движения поездов (ИУДП), задача которых – обеспечение высокой эффективности и безопасности перевозочного процесса. К таким системам относятся автоблокировка, автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) и др.

Автоматической локомотивной сигнализацией непрерывного типа (АЛСН) оборудовано более 70 % эксплуатационной длины магистральных железнодорожных линий России. Опыт эксплуатации показывает недостаточную устойчивость ее функционирования, выражющуюся в значительном числе сбоев в ее работе. Они оказывают негативное влияние на процесс ИУДП, снижая уровень безопасности движения и пропускную способность перегонов и станций.

Статистический анализ сбоев в работе АЛСН на железной дороге за период с 2018 по 2022 гг. показывает, что доля сбоев первой категории ежегодно растет (с 32,8 % в 2018 г. до 48,8 % в 2022 г.). Одной из важнейших причин этих сбоев являются электромагнитные помехи, действующие на локомотивный приемник канала АЛСН. За этот же период доля сбоев, вызываемых помехами, в общем числе сбоев третьей категории увеличилась с 36,7 % до 53,1 %.

С 2018 по 2022 гг. на железной дороге доля локомотивов, оборудованных микропроцессорными локомотивными устройствами безопасности (МЛУБ) (комплексное локомотивное устройство безопасности КЛУБ-У, безопасный локомотивный объединенный комплекс БЛОК, дешифратор кодовых сигналов микропроцессорный ДКСВ-М), увеличилась с 53,3 % до 87,0 %. Цифровая

обработка сигналов АЛСН, применяемая в МЛУБ, создает возможности разработки и реализации в локомотивном приемнике канала АЛСН помехоустойчивых способов и алгоритмов приема и тем самым повышения устойчивости функционирования канала АЛСН.

С учетом изложенного, повышение помехоустойчивости приемника канала АЛСН в МЛУБ является актуальной научно-технической задачей.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках конкурса «УМНИК» по договору 18461ГУ/2023 от 16.08.2023 г. о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в 2024-2026 гг., тема НИР: «Разработка корреляционного приемного устройства автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа для железных дорог Российской Федерации».

**Степень разработанности темы.** Исследованием электромагнитной обстановки в каналах систем автоматики и телемеханики занимались известные ученые: В.С. Аркадов, Ю.А. Кравцов, В.И. Шаманов, Н.Ф. Котляренко, И.В. Беляков, А.В. Бушуев, Е.М. Тарасов, Ю.М. Иваненко, А.Е. Пыров, П.Ф. Бестемьянов, В.Б. Леушин, А.К. Табунников, А.В. Пультиков, Ю.А. Трофимов, Г.П. Малай, В.А. Засов и другие.

Значительный вклад в развитие и модернизацию локомотивных устройств АЛС внесли: А.М. Брылеев, В.М. Лисенков, Е.Н. Розенберг, Д.В. Шалягин, В.В. Демьянов, А.В. Вековищев, Р.Р. Юсупов, В.С. Дмитриев, В.И. Астрахан, М.П. Бадёр, К.А. Бочков, А.И. Годяев, А.В. Горелик, Е.Г. Щербина и другие.

**Целью диссертационной работы** является повышение помехоустойчивости приемника сигналов канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа.

Для достижения указанной цели в диссертации сформулированы **следующие задачи:**

- анализ современного состояния научно-технической проблемы устойчивости функционирования АЛСН в условиях действия помех;
- разработка алгоритма функционирования и имитационной модели помехоустойчивого приемника сигналов АЛСН;
- исследование на имитационной модели алгоритма функционирования помехоустойчивого приемника сигналов АЛСН при наличии дестабилизирующих факторов и оценка его помехоустойчивости при воздействии аддитивных флюктуационных, импульсных и гармонических помех;
- техническая реализация помехоустойчивого приемника сигналов АЛСН и сравнительная оценка его помехоустойчивости в условиях, приближенных к условиям функционирования при реализации процесса ИУДП.

**Объектом исследования** является автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа АЛСН, реализующая процесс ИУДП.

**Предметом исследования** являются методы приема амплитудно-манипулированного сигнала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН.

**Научная новизна** полученных автором диссертации результатов состоит в следующем.

1. Предложен способ поэлементного приема сигналов АЛСН, отличающийся применением квадратурного амплитудного детектирования огибающей с восстановлением ее амплитуды, позволяющий вследствие инвариантности результата детектирования к начальной фазе принимаемого несущего колебания отказаться от системы фазовой автоподстройки частоты, что снижает сложность приемника, а также устранить снижение его чувствительности за счет восстановления амплитуды огибающей.

2. Предложен способ подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования, отличающийся применением амплитудного ограничения в импульсах сигналов АЛСН и бланкирования в его интервалах, позволяющий уменьшить влияние помех.

3. Разработана методика определения порога амплитудного ограничения или бланкирования импульсных помех, учитывающая временные параметры сигнала АЛСН и условия его распространения по рельсовой линии, что позволяет обеспечить эффективное нелинейное подавление импульсных помех без искажения сигнала.

4. Разработан алгоритм обработки сигнала АЛСН с квадратурным амплитудным детектированием огибающей и восстановлением ее амплитуды, а также применением нелинейных подавителей импульсных и гармонических помех, обеспечивающий повышение помехоустойчивости и безопасности функционирования приемника сигналов АЛСН.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В результате проведенных научно-практических исследований повышена помехоустойчивость и безопасность функционирования локомотивного приемника сигналов АЛСН в условиях действия помех. Это позволит за счет уменьшения числа сбоев в работе АЛСН снизить количество вынужденных выключений локомотивных устройств безопасности и необоснованных проверок бдительности машиниста (уменьшив психофизиологическую нагрузку на машиниста), что, в свою очередь, повысит эффективность и безопасность процесса ИУДП.

Предложенный и реализованный в работе способ приема сигналов АЛСН на основе квадратурного амплитудного детектирования огибающей с восстановлением ее амплитуды обеспечивает достоверный прием сигнала АЛСН с номинальной амплитудой при отклонениях частоты его несущей от номинального значения на 9 Гц.

Разработанный и реализованный в работе алгоритм обработки сигнала АЛСН с квадратурным амплитудным детектированием огибающей и восстановлением ее амплитуды, а также применением нелинейных подавителей импульсных и гармонических помех, согласно патенту автора «Приемник автоматической локомотивной сигнализации» № RU218341 от 23.05.2023 г., позволяет уменьшить число ошибок в работе приемника сигналов АЛСН в 3,8 раза, а долю опасных ошибок – с 95 % до 25 %.

**Методология и методы исследования.** В соответствии с паспортом научной специальности 2.9.4 п. 5 «Теоретические основы, методы и технические средства обеспечения безопасности движения», п. 6 «Системы и устройства автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, их эксплуатация, методы построения и испытания» и п. 7 «Развитие технических средств и систем управления, цифровизация управления транспортными технологическими процессами» в ходе выполнения диссертационных исследований автором использованы основные положения теории рельсовых цепей, методы имитационного моделирования на ЭВМ и статистического анализа, методы нелинейной обработки сигналов. Расчеты выполнены с использованием математических пакетов MATLAB (в том числе среды имитационного моделирования Simulink) и Mathcad.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Предложенный способ приема сигналов АЛСН, отличающийся применением квадратурного амплитудного детектирования огибающей с восстановлением ее амплитуды, позволяет вследствие инвариантности результата детектирования к начальной фазе принимаемого несущего колебания отказаться от системы фазовой автоподстройки частоты, что снижает сложность приемника, а также устранить снижение его чувствительности за счет восстановления амплитуды огибающей.

2. Предложенный способ подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования, отличающийся применением амплитудного ограничения в импульсах сигналов АЛСН и бланкирования в его интервалах, позволяет уменьшить влияние помех.

3. Разработанный алгоритм обработки сигнала АЛСН с квадратурным амплитудным детектированием огибающей и восстановлением ее амплитуды, а также применением нелинейных подавителей импульсных и гармонических помех, позволяет повысить помехоустойчивость и безопасность функционирования приемника сигналов АЛСН и тем самым повысить эффективность и безопасность процесса ИУДП.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** Достоверность результатов исследований подтверждена тем, что теоретические результаты полученные в ходе выполнения диссертации, согласуются с результатами полунатурного эксперимента: экспериментальный образец помехоустойчивого приемника в сравнении с приемником сигналов АЛСН комплексного локомотивного устройства безопасности допустил в 3,8 раза меньше ошибок в приеме, при этом доля опасных ошибок уменьшилась с 95 % до 25 %.

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены в работе научно-практических конференций, в том числе: IV Всероссийской научно-практической конференции «Образование – Наука – Производство» (г. Чита, 2020 г.); XIV-XVII Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (г. Самара, 2021-2024 гг.); II Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); VII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения» (г. Челябинск, 2023 г.); Международной научно-практической конференции «Транспортная наука и инновации», посвященной юбилею СамГУПС (г. Самара, 2023 г.); IX Международной научно-практической конференции «Наука и образование: достижения и перспективы» (г. Саратов, 2024 г.).

Предложенный способ подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования в виде амплитудного ограничения и бланкирования использован в Кинельской дистанции сигнализации, централизации и блокировки – структурном подразделении Куйбышевской дирекции инфраструктуры – Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».

Теоретические результаты исследований используются в ФГБОУ ВО ПривГУПС в учебном процессе на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» при чтении лекций, проведении практических

занятий и лабораторных работ, выполнении курсовой работы по курсам «Теория передачи сигналов» и «Микропроцессорные и микроэлектронные системы перегонной автоматики».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ общим объемом 11 п. л. (личный вклад автора – 4,99 п. л.), в том числе: 2 – входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, 8 – в ведущих рецензируемых журналах, определенных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, получен 1 патент на полезную модель и 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, имеющего 114 наименований и семи приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 203 страницы, включая 69 рисунков, 20 таблиц и 32 страницы приложений.

# 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА АЛСН

При реализации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте безопасные интервалы между попутно следующими поездами и ограничение величины их фактической скорости до уровня ниже допустимой по состоянию пути и технических сооружений обеспечивают системы ИУДП [1].

ИУДП реализуется с помощью систем автоматической блокировки и АЛС [2, 3]. АЛС предназначена для передачи информации о показаниях напольных светофоров и ограничениях скорости движения поезда в кабину машиниста поездного локомотива независимо от погодных условий, рода тяги и профиля пути [4]. Основной функцией систем АЛС является автоматическая выработка управляющих сигналов на снижение скорости поезда на заданную величину в заданных точках пути в соответствии с поездной ситуацией, состоянием верхнего строения пути (ВСП) и технических сооружений, целостью рельсов.

Решение о снижении скорости поезда темпом полного служебного или экстренного торможения принимается машинистом или автоматически устройствами АЛС на основе информации, передаваемой от напольных к локомотивным устройствам по индуктивно-рельсовым линиям связи (ИРЛ) и с помощью специальных точечных датчиков.

Самой распространенной системой локомотивной сигнализации на сети железных дорог РФ является система АЛСН: из 85,9 тыс. км эксплуатационной длины магистральных железных дорог около 63 тыс. км оборудовано автоблокировкой и АЛСН [5]. Локомотивными (бортовыми) устройствами АЛСН на 2022 год оборудованы более 20 тыс. единиц тягового подвижного состава [6]. Данная система является одним из важнейших элементов железнодорожной инфраструктуры при организации эффективного и безопасного перевозочного процесса.

Сложная электромагнитная обстановка (особенно на электрифицированных участках железных дорог) приводит к снижению устойчивости функционирования АЛСН и возникновению сбоев в ее работе – нарушений работы устройств АЛСН и (или) алгоритма ее функционирования с последующим самовосстановлением или после регламентированного воздействия оператора (машиниста локомотива, скоростного, высокоскоростного поезда, МВПС, ССПС, ССПС-КХ и т.д.), не повлекших за собой задержку поезда [7, 8]. Ежегодно число сбоев в работе АЛСН на сети железных дорог Российской Федерации составляет десятки тысяч. Сбои увеличивают психофизиологическую нагрузку на локомотивные бригады и могут спровоцировать отключение АЛСН в пути следования, что приводит к отключению и автостопа и, как следствие – к снижению уровня безопасности движения поездов. Необходимость учета и расследования сбоев приводит к дополнительным эксплуатационным затратам.

### **1.1 Анализ сбоев в работе АЛСН на железной дороге**

Для оценки масштаба анализируемой проблемы, характеристик сбоев в работе АЛСН, динамики изменения количества сбоев по годам и последующего определения направления снижения их числа целесообразно провести анализ сбоев в работе АЛСН за последние несколько лет. В качестве опытного полигона для проведения анализа выбрана одна из железных дорог. Эксплуатационная длина ее железнодорожных путей общего пользования составляет 4728 км, из них более 4400 км оборудовано системой АЛСН.

Оценить влияние сбоев в работе АЛСН на безопасность движения поездов позволяет их анализ по характеру проявления. Согласно ГОСТ 53431-2009 «Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения» [9] опасный отказ железнодорожной автоматики и телемеханики – это событие, при котором нарушаются работоспособное и защитное состояния системы железнодорожной автоматики и телемеханики. Применительно к системам АЛС опасным отказом является сбой, вызвавший появление на локомотивном светофоре

более разрешающего сигнального показания, чем показание напольного светофора; в противном случае (появление более запрещающего сигнального показания) сбой является защитным отказом.

Распределение количества и доли сбоев в работе АЛСН по характеру проявления на анализируемой железной дороге за период 2018-2022 гг. представлено на рисунке 1.1. По оси абсцисс отмечены года наблюдений, а по оси ординат – доли в процентах сбоев по характеру проявления в общем количестве сбоев. Светло-зеленым цветом показана доля сбоев с характером проявления «З-Б-Ж», желтым – с характером проявления «Ж-Б-З», темно-зеленым – с характером проявления «З-Б-З», а голубым – доля сбоев со всеми оставшимися характерами, отнесенными к категории «остальные сбои». Числами внутри столбцов показаны абсолютное количество сбоев по характеру проявления и их доля в процентах от общего количества сбоев. Наиболее многочисленными являются сбои с характером «З-Б-З», относящиеся к защитным отказам; вторыми по многочисленности являются сбои с характером «Ж-Б-З», относящиеся к опасным отказам. Третьими по многочисленности являются сбои с характером «З-Б-Ж», также относящиеся к защитным отказам.

В течение анализируемого периода доля сбоев с характером проявления «Ж-Б-З», относящихся к опасным отказам, ежегодно снижалась, но все еще остается значительной (в 2022 году – 8,86 % от общего количества сбоев). Доля сбоев с характером проявления «З-Б-Ж» практически не изменилась (с 9,22% в 2018 году до 8,54% в 2022 году), а доля сбоев с характером проявления «З-Б-З» росла (с 40,62% в 2018 году до 49,58% в 2022 году). Следует отметить высокую долю остальных сбоев (с не детализированным характером проявления) – порядка одной трети всего количества сбоев на анализируемом периоде времени. В их число входят как сбои, относящиеся к защитным отказам (с характером проявления «З-КЖ-З», «З-Ж-З» и др.), так и к опасным (с характером проявления «Ж-КЖ-З», «Ж-К-З», «КЖ-К-З» и др.).

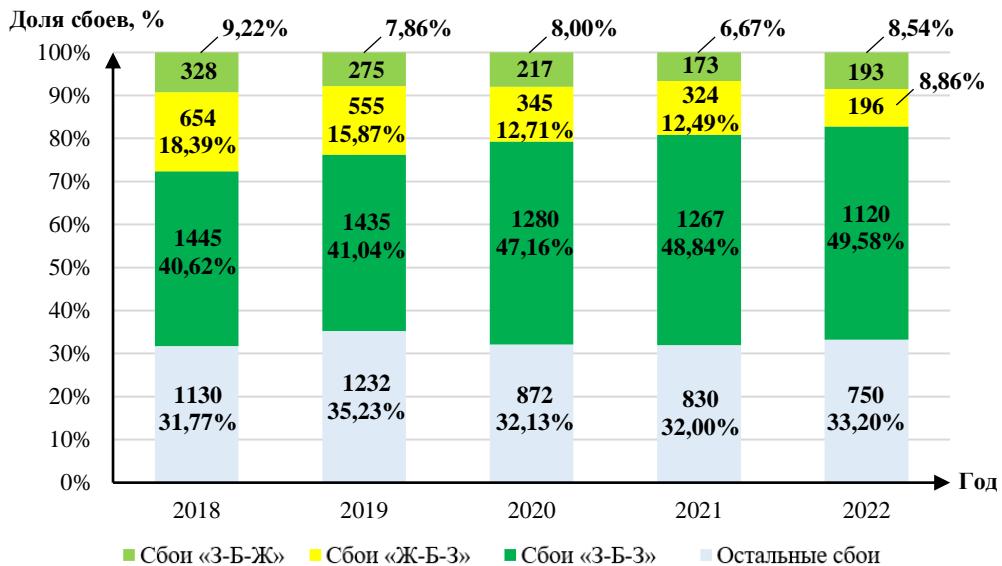


Рисунок 1.1 – Распределение количества и доли сбоев в работе АЛСН по характеру проявления на анализируемой железной дороге за период 2018-2022 гг.

Таким образом, значительная часть сбоев в работе АЛСН приводит к снижению безопасности движения поездов.

С 2016 года в ОАО «РЖД» согласно распоряжению № 1011р от 30.05.2016 [8] введена классификация сбоев АЛСН, АЛС-ЕН и САУТ по трем категориям.

Первая категория – сбои в работе устройств АЛСН, АЛС-ЕН, САУТ, возникшие в результате допущенных отступлений от норм содержания путевых и локомотивных технических средств, нарушения правил производства работ, ремонта и других требований нормативных документов, а также сбои, повторяющиеся в конкретном месте или на конкретном локомотиве (МВПС, ССПС) в определенный период, причина которых не установлена.

Вторая категория – сбои, отнесённые по результатам расследования к «одиночным». Автоматизированная система АСУ-Ш-2 относит сбой к разряду одиночных в том случае, если обеспечивается выполнение трёх необходимых условий:

а) в результате расследования причина сбоя не установлена, а параметры локомотивных и путевых устройств соответствуют установленным требованиям

- б) на данном конкретном месте сбои отсутствовали в течение 2-х суток до данного сбоя и 2-х суток после него;
- в) на данном конкретном локомотиве (учитывая № секции для многосекционных) отсутствовали сбои с неустановленной причиной в течение 1-х суток до данного сбоя и 1-х суток после него.

Проверка выполнения указанных условий и отнесение сбоев к разряду одиночных осуществляется автоматически. Одиночные сбои подлежат учёту, но не относятся к определенному хозяйству.

Третья категория – технологически обоснованные сбои в работе устройств АЛС. Под технологически-обоснованными сбоями понимаются сбои, произошедшие из-за двойной смены кода; помех, возникающих в месте пересечения железнодорожной линии с высоковольтной линией электропередачи (ЛЭП) или другими источниками помех, а также сбои при движении поезда по коротким изолированным участкам. Данная категория сбоев подлежит учёту и анализу, но не относится к определенному хозяйству. Выполнение мероприятий по их устранению (минимизации) осуществляется в плановом порядке.

На рисунке 1.2 представлено распределение сбоев в работе системы АЛСН на анализируемой железной дороге по указанным выше категориям за период 2018-2022 гг. По оси абсцисс отмечены года наблюдений, а по оси ординат – количество сбоев АЛСН в шт. Зеленым цветом показано количество сбоев первой категории за соответствующий отчётный год, синим – количество сбоев второй категории и розовым – количество сбоев третьей категории. Числами внутри столбцов показаны количество сбоев каждой из категорий и их доля от общего количества сбоев в процентах.

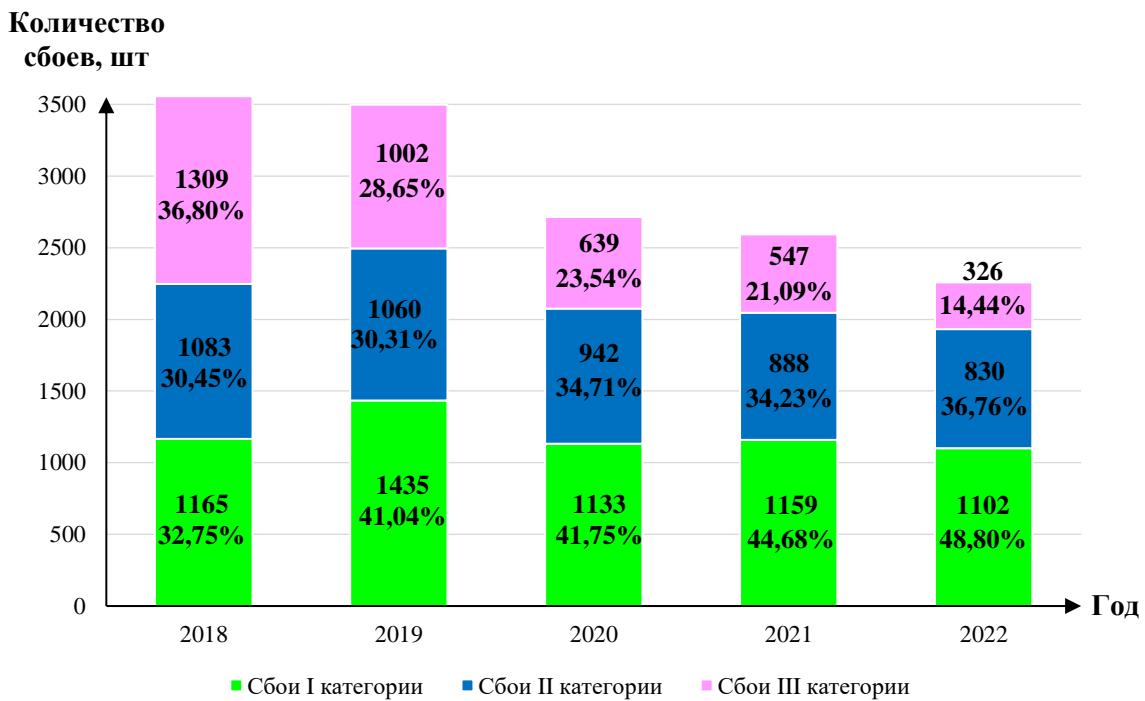


Рисунок 1.2 – Распределение сбоев в работе системы АЛСН по категориям на анализируемой железной дороге за период 2018-2022 гг.

Рисунок 1.2 показывает, что за период 2018-2022 гг. значительно снизилась доля сбоев третьей категории (с 36,80 до 14,44 %), существенно выросла доля сбоев первой категории (с 32,75 до 48,80 %), доля сбоев второй категории незначительно выросла (с 30,45 до 36,76 %).

Согласно [8], детализированная статистика повторяющихся сбоев по выявленным причинам ведется только по первой и третьей категориям. У сбоев, отнесенных ко второй категории (одиночных), причина их возникновения по результатам расследования не устанавливается, поэтому сбои данной категории из анализа были исключены.

Таким образом, для разработки предложений, направленных на снижение интенсивности сбоев в работе АЛСН на анализируемой железной дороге, целесообразно рассмотреть причины возникновения сбоев, относящихся к первой и третьей категориям.

Все сбои в работе АЛСН, отнесенные к первой категории, с установленной причиной, можно классифицировать, разделив на две группы:

- 1) сбои, произошедшие из-за неисправности путевых устройств АЛСН;
- 2) сбои, произошедшие из-за неисправности локомотивных устройств АЛСН.

К первой группе отнесем сбои, произошедшие по вине хозяйства автоматики и телемеханики, хозяйства пути и сооружений, дирекции ремонта пути, хозяйства электрификации и электроснабжения, дирекции управления движением, дирекции связи и дирекции пассажирских обустройств.

Ко второй группе отнесем сбои, произошедшие по вине дирекции тяги, дирекции ремонта тягового подвижного состава и сервисных компаний, а также по вине завода-изготовителя или разработчика электронной карты.

Сбои, отнесенные в первую группу, могут происходить по следующим причинам.

I. Асимметрия тягового тока. В большинстве случаев она возникает из-за некачественного содержания ВСП. Из основных причин, которые приводят к увеличению асимметрии тягового тока, можно выделить:

- а) отсутствие или неисправность стыковых соединителей;
- б) неисправность перемычек или путевых дроссель-трансформаторов;
- в) неисправность изолирующих стыков.

Асимметрия тягового тока приводит к появлению помех в ИРЛ канала АЛСН, попадающих на вход локомотивного приемника и вызывающих сбои [10-13].

II. Остаточная намагниченность элементов ВСП:

- а) стрелочных переводов или искусственных сооружений;
- б) рельсов, уложенных в колее и на концах шпал.

При прохождении локомотива в зоне влияния остаточной намагниченности элементов ВСП на выходе ЛПК возникает паразитная ЭДС помехи, попадающая на вход приемника и вызывающая сбои [14-19].

III. Нарушение правил производства работ.

IV. Неисправность или нестабильная работа напольного передающего устройства (ПДУ) по причинам:

- а) неисправность путевых трансмиттеров и других приборов кодирования;
- б) неисправность монтажа или потеря контакта в штепсельных разъемах;
- в) неправильная регулировка тока кодирования;
- г) нестабильное электропитание напольного ПДУ.

V. Прочие причины – неисправность искровых промежутков, необеспечение шунтовой чувствительности, нарушение нормативного срока расследования и т.п.

Сбои, отнесенные во вторую группу, могут происходить по следующим причинам.

I. Неисправность локомотивных устройств АЛСН по вине сервисных компаний или ответственных структурных подразделений железной дороги.

II. Неисправность локомотивных устройств АЛСН по вине сервисных компаний или структурных подразделений соседних железных дорог.

III. Неисправность локомотивных устройств АЛСН по вине завода-изготовителя или разработчика электронной карты.

На рисунке 1.3 представлен график распределения количества сбоев в работе системы АЛСН, отнесенных к первой категории, с установленной причиной, построенный в соответствии с вышеприведенной классификацией. График построен по данным за период с 2018 по 2022 год. По оси абсцисс отмечены причины сбоев в работе АЛСН, по оси ординат – количество сбоев в шт, а по оси аппликат – год. Числами над столбцами обозначено количество сбоев в шт.

Рисунок 1.3 показывает, что за период с 2018 по 2022 год количество сбоев первой категории, учитываемых в данном анализе, уменьшилось с 1154 до 1103, или на 4,6 %.

Доля сбоев, отнесенных к первой группе, за анализируемый период уменьшилась с 60,7 до 49,0 % от общего количества сбоев в обеих группах. Наибольшее количество сбоев, отнесенных к данной группе, наблюдается из-за неисправности или нестабильной работы ПДУ канала АЛСН, асимметрии тягового тока и остаточной намагниченности элементов ВСП.

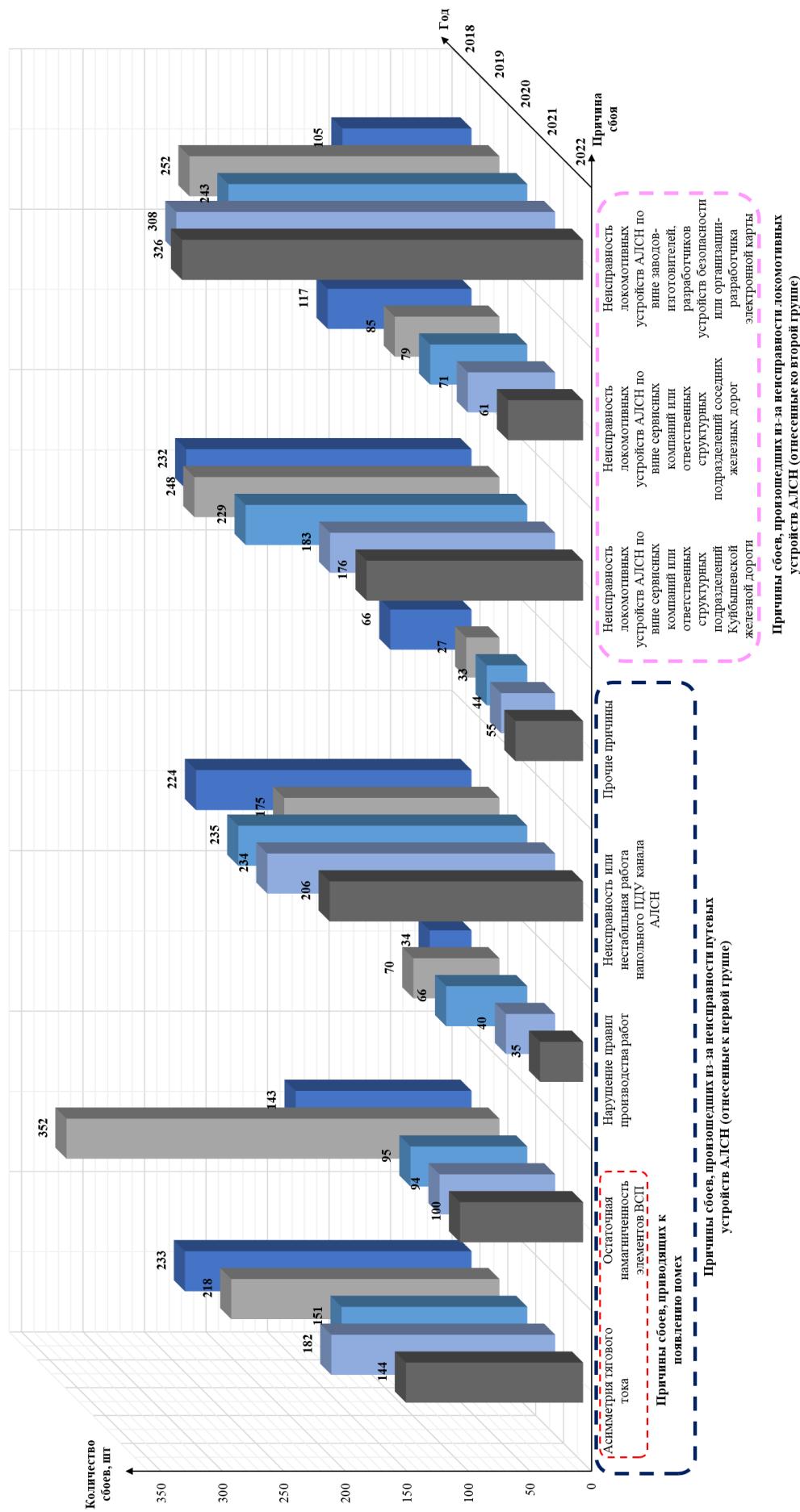


Рисунок 1.3 – График распределения сбоев первой категории в работе системы АЛСН с установленной причиной за 2018-2022 гг.

установленной причиной за 2018-2022 гг.

Доля сбоев по причине неисправности или нестабильной работы ПДУ от общего количества сбоев первой категории составляла от 19,4 % в 2018 году до 18,6 % в 2022 году, т. е. почти пятую часть. Причем за анализируемый период положительная динамика практически отсутствует. Это, как представляется вероятным, связано с низкой надежностью эксплуатируемой релейно-контактной аппаратуры напольного ПДУ канала АЛСН (кодового путевого трансмиттера типа КПТШ и трансмиттерного реле типа ТШ) и отказом от массового внедрения ее бесконтактных аналогов (бесконтактного кодового путевого трансмиттера типа БКПТ и бесконтактного коммутатора тока типа БКТ) из-за их высокой себестоимости и недостаточной безопасности (БКПТ) и пожароопасности (БКТ) [20-22].

Суммарная доля сбоев, произошедших по причинам асимметрии тягового тока и остаточной намагниченности элементов ВСП составляла от 32,6 % в 2018 году до 22,1 % в 2022 году от общего количества сбоев в обеих группах. Сбои по данным причинам являются самыми многочисленными в первой группе. Влияние асимметрии тягового тока и остаточной намагниченности элементов ВСП проявляется в том, что на входе приемника возникают помехи, искажающие сигнал АЛСН и приводящие к ошибкам в его приеме [23, 24].

Доля сбоев, отнесенных ко второй группе, за анализируемый период увеличилась с 39,3 до 51,0 %. При этом наблюдается тенденция снижения количества сбоев по причине неисправности локомотивных устройств АЛСН по вине сервисных компаний и ответственных структурных подразделений анализируемой и других железных дорог (уменьшение их доли с 35,4 до 21,5 % от общего количества сбоев в обеих группах). Эту тенденцию можно объяснить постепенной заменой трудоемкой и сложной в обслуживании аналогово-релейной аппаратуры АЛСН на малообслуживаемую микропроцессорную аппаратуру современных бортовых локомотивных устройств безопасности (БЛОК, КЛУБ-У, ДКСВ-М) [25]. Так, за период с 2019 по 2023 гг. доля локомотивов на

анализируемой железной дороге, оборудованных аналогово-релейной АЛСН, уменьшилась с 46,7 % до 13,0 %.

Доля сбоев по причине неисправности локомотивных устройств АЛСН по вине заводов-изготовителей, разработчиков устройств безопасности или организации-разработчика электронной карты за анализируемый период выросла с 9,1 до 29,6 % от общего количества сбоев в обеих группах. При этом количество сбоев по вине заводов-изготовителей и разработчиков устройств безопасности увеличилось с 89 до 314 (в 3,5 раза), а по вине организации-разработчика электронной карты – уменьшилось с 16 до 12. Определить причины негативной динамики количества сбоев по вине заводов-изготовителей и разработчиков устройств безопасности по имеющимся статистическим данным не представляется возможным ввиду отсутствия указания причин таких сбоев.

Сбои третьей категории согласно [8] детализируются по конкретным причинам возникновения, но не относятся к определённому хозяйству.

На рисунке 1.4 представлено распределение сбоев третьей категории в работе АЛСН на анализируемой железной дороге за период 2018-2022 гг. в зависимости от их причин. По оси абсцисс отмечены года наблюдений, а по оси ординат – доли в процентах сбоев по конкретным причинам в общем количестве сбоев третьей категории. Красным цветом показана доля сбоев, произошедших по причине двойной смены кодов, желтым – по причине помех, возникающих в месте пересечения железнодорожной линии с высоковольтной ЛЭП или другими источниками помех, а черным – по причине проезда локомотива по коротким изолированным участкам.

Рисунок 1.4 показывает, что в третьей категории доля сбоев по причине пересечения железнодорожной линии с высоковольтной ЛЭП или другими источниками помех ежегодно росла, достигнув в 2022 году 53,1 %, а доля сбоев, произошедших по причине двойной смены кода или проезда по коротким изолированным участкам – уменьшалась.



Рисунок 1.4 – Распределение доли сбоев третьей категории в работе системы АЛСН в зависимости от причин на анализируемой железной дороге за период 2018-2022 гг.

На рисунке 1.5 представлено распределение сбоев в работе АЛСН за 2022 г. по причинам их возникновения, из которого видно, что основными причинами сбоев в работе АЛСН на анализируемой железной дороге являлись:

- 1) сбои по причине неисправности локомотивных устройств АЛСН (24,9 % от общего количества принятых к учету сбоев), в том числе по вине:
  - a) заводов-изготовителей и разработчиков устройств безопасности (13,9 %);
  - b) сервисных компаний и ответственных структур подразделений железных дорог (10,5 %);
  - c) организации-разработчика электронной карты (0,5 %);
- 2) сбои в результате воздействия помех (18,5 % от общего количества принятых к учету сбоев), в том числе по причинам:
  - a) влияния помех от ЛЭП или других источников (7,7 %).
  - b) асимметрии тягового тока (6,4 %);
  - c) остаточной намагниченности элементов ВСП (4,4 %);
- 3) сбои по причине неисправности или нестабильной работы ПДУ канала АЛСН (9,1 % от общего количества принятых к учету сбоев).



Рисунок 1.5 – Распределение сбоев в работе АЛСН за 2022 г. по причинам их возникновения

Дополнительно следует отметить высокую долю сбоев второй категории («одиночных») – 36,8 % от общего количества принятых к учету сбоев. Обстоятельства возникновения таких сбоев позволяют предположить, что причиной их явились случайные кратковременно действующие факторы. К таким факторам в первую очередь можно отнести кратковременный рост интенсивности помех в индуктивно-рельсовой линии канала АЛСН. Так, интенсивность импульсных помех (ИП) от тягового тока резко увеличивается в результате коммутационных процессов в силовых цепях локомотива (переключение схем цепей управления тяговыми электродвигателями, набор и сброс позиций контроллера машиниста) [26, 27]. Наиболее интенсивные ИП наблюдаются на участках с электротягой постоянного тока [26], преобладающих на анализируемой дороге (по данным на 2019 год в дирекции по энергообеспечению находится в обслуживании 151 тяговая подстанция, в том числе 144 постоянного тока, 4 переменного тока и 3 переменно-постоянного тока на станциях стыкования).

Особенностью ИП от тягового тока является то, что они зачастую формируются в виде пачек длительностью до 7 с [27] и могут поражать три и более подряд идущие кодовые комбинации (КК) АЛСН, что с учетом алгоритма их дешифрации приводит к сбою в работе АЛСН.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, в качестве основных направлений снижения числа сбоев в работе АЛСН можно выделить:

- 1) повышение надежности локомотивных устройств АЛСН;
- 2) повышение помехоустойчивости приемника канала АЛСН;
- 3) повышение качества технического содержания верхнего строения пути и модернизация аппаратуры ПДУ канала АЛСН.

В рамках **первого направления** снижение числа сбоев в работе АЛСН по вине заводов-изготовителей, разработчиков устройств безопасности, сервисных компаний и ответственных структурных подразделений железных дорог возможно путем:

- совершенствования системы мониторинга и анализа работы локомотивных устройств безопасности, обеспечивающей постоянный контроль работы устройств безопасности на всех уровнях, анализ статистических данных и разработку мероприятий по предупреждению отказов и неисправностей оборудования во взаимодействии персонала контрольных и контрольно-ремонтных пунктов АЛСН (КП и КРП АЛСН) с разработчиками и изготовителями устройств безопасности;
- совершенствовании системы технического обслуживания и ремонта локомотивных устройств безопасности на КП АЛСН.

Система мониторинга и анализа работы локомотивных устройств безопасности в настоящее время включает в себя:

- локомотивные комплексы и устройства регистрации: регистратор сигналов автоматической локомотивной сигнализации БРС-АЛС [28] регистратор параметров движения и автovedения РПДА [29], комплексы КПД-3 различных модификаций [30] и др.;
- автоматизированная система учета, анализа и расследования нарушений безопасности движения АСУТ НБД-2;

– комплекс задач АСУ-Ш-2 «Учет и анализ нарушений работы устройств АЛСН, САУТ, КЛУБ» (КЗ АЛСН) [31, 32].

Задача совершенствования этой системы в настоящее время видится в первую очередь в повышении полноты и достоверности содержащейся в ней информации, необходимой для выявления причин неисправности локомотивных устройств АЛСН.

В работе [25] показано, что значительная часть сбоев аппаратуры АЛСН приходится на т.н. «сбойные» локомотивы и «проблемные» серии локомотивов, на которых не обеспечивается ЭМС аппаратуры АЛСН и силового оборудования. Для достоверного установления причин этих сбоев требуется проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований по определению параметров ЭМС аппаратуры АЛСН и силового оборудования локомотива, создание методик проверки и соответствующих стендов для определения локомотивов с низкой ЭМС аппаратуры АЛСН и причин сбоев на них. В работе [33] разработаны и обоснованы новые технические и технологические решения, направленные на повышение надежности работы локомотивных устройств безопасности путем повышения достоверности результатов процесса их технического обслуживания в условиях контрольных пунктов и тем самым исключения допуска к эксплуатации тягового подвижного состава, локомотивные устройства безопасности которого находятся в неработоспособном или предотказном состоянии. Эффективность предложенных и внедренных решений можно будет оценить в ближайшие годы по динамике статистики сбоев по причине неисправности локомотивных устройств АЛСН.

В рамках **второго направления** числа сбоев в работе АЛСН возможно путем разработки новых научно-технических решений, позволяющих уменьшить количество ошибок в приеме сигнала АЛСН, допускаемых локомотивным приемником, путем повышения его помехоустойчивости. В первую очередь речь здесь идет о микропроцессорных приемниках канала АЛСН, поскольку потенциал повышения помехоустойчивости аналогово-релейных приемников практически исчерпан ввиду ограниченности функциональных возможностей используемой элементной базы [25, 34, 35].

В основе большинства предложенных к настоящему времени научно-технических решений по повышению помехоустойчивости локомотивного приемника – использование положений теории оптимального приема сигналов [36], применение нелинейного преобразования для подавления негауссовых помех (импульсных и гармонических) и корреляционного приема сигналов АЛСН, реализация которых на аналогово-релейной элементной базе практически не представляется возможной. О вариантах технической реализации таких решений будет сказано позднее в подразделе, посвященном анализу методов и технических решений по повышению помехоустойчивости приемника канала АЛСН.

В рамках **третьего направления** уменьшение числа сбоев в работе АЛСН возможны путем:

- 1) проведения масштабных (по всей сети железных дорог) организационно-технических мероприятий по приведению к нормам и поддержанию на требуемом уровне технического состояния элементов ВСП, образующих рельсовую линию канала АЛСН;
- 2) разработки и внедрения на всей сети железных дорог надежной, безопасной и недорогой бесконтактной аппаратуры ПДУ канала АЛСН (путевых трансмиттеров и коммутаторов тока).

Что касается первого из перечисленных пунктов, то такие мероприятия проводятся всеми железными дорогами ежегодно на постоянной основе. Результаты их проведения отражаются в положительной динамике снижения количества сбоев по причине асимметрии тягового тока и остаточной намагниченности ВСП. Так, на анализируемой железной дороге за пять лет (с 2018 по 2022 гг.) количество сбоев по причине асимметрии тягового тока уменьшилось с 233 до 144 (в 1,62 раза), а по причине остаточной намагниченности ВСП – с 143 до 100 (в 1,43 раза). Тем не менее, в абсолютном и относительном выражении количество сбоев по этим причинам остается высоким.

Что же касается второго пункта, то, как было указано ранее, данная задача пока не получила эффективного решения.

Из трех рассмотренных направлений снижения числа сбоев в работе АЛСН целесообразным представляется второе (повышение помехоустойчивости приемника канала АЛСН), поскольку оно потребует существенно меньшего объема организационно-технических мероприятий в сравнении с другими направлениями, позволяя в то же время уменьшить влияние негативных факторов, борьба с которыми осуществляется в рамках первого и третьего направлений.

Так, повышение помехоустойчивости приемника может уменьшить его чувствительность к искажениям временных параметров сигналов АЛСН, вызванных отклонением от номинальных значений характеристик напольного оборудования ПДУ канала АЛСН (кодового путевого трансмиттера и трансмиттерного реле). Помимо этого, повышение помехоустойчивости приемника позволит снизить негативное влияние асимметрии тягового тока по рельсовой линии и неравномерной намагниченности рельсов, являющихся значимыми источниками помех в канале АЛСН [10-19, 37-42]. Такого эффекта на всей сети железных дорог можно будет достигнуть путем модернизации эксплуатируемых микропроцессорных локомотивных устройств безопасности, гораздо меньших по количеству, чем приборов кодирования рельсовых цепей.

## **1.2 Методы и технические решения по повышению помехоустойчивости локомотивного приемника канала АЛСН**

Для выявления тенденций развития технических решений, направленных на снижение числа сбоев в работе АЛСН за счет повышения помехоустойчивости локомотивного приемника канала АЛСН, было проведено исследование уровня техники в Российской Федерации с глубиной поиска 20 лет в форме патентного исследования. Глубина поиска определена с учетом того, что именно на эти годы пришли активные разработка и внедрение современного электрического подвижного состава с тяговым приводом повышенной мощности, с асинхронным тяговым приводом [43], а на железных дорогах расширилась практика

формирования тяжеловесных поездов и организации движения по системе многих единиц, что привело к ухудшению помеховой обстановки в каналах АЛС.

С учетом предмета исследования, сформулированного ранее, были определены следующие наиболее подходящие группы Международной патентной классификации (МПК): B61L 3, B61L 23, B61L 25. При задании поисковых терминов использовались следующие ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации, приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации, устройство подавления помех, защита от помех. Поиск осуществлен по реферативной базе Федерального института промышленной собственности.

В результате поиска было отобрано 28 патентных документов. Результаты поиска актуальны на дату 01.03.2022.

Рассмотрим подробнее наиболее существенные признаки, использованные авторами для повышения помехоустойчивости локомотивного приемника канала АЛСН.

В работе [44] авторами для подавления импульсных помех от тягового тока предлагается применить двухстороннее симметричное амплитудное ограничение сигнала с регулируемым порогом ограничения, а для компенсации действия гармонических помех – вычесть из детектированной огибающей сигнала вызванную этими помехами постоянную составляющую на выходе амплитудного детектора. В [45] авторами предлагается компенсация помех от наиболее мощных гармоник тягового тока путем их выделения полосовыми фильтрами из смеси сигнала и помех, действующей на выходе локомотивных приемных катушек, корректировки амплитуды и фазы этих гармоник и последующего вычитания из смеси сигнала и помех.

В [46] для повышения достоверности распознавания сигналов АЛСН в условиях воздействия внешних помех и нестабильности несущей частоты кодовых сигналов в приемнике осуществляется амплитудное детектирование огибающей сигнала, посредством преобразования Фурье вычисляется ее амплитудный спектр, который усредняется и осуществляется его корреляционная идентификация по

образцовым спектрам сигналов всех типов трансмиттеров. Далее идея получила развитие в [47], где дополнительно введены блок регистрации условий сбоев в работе приемника сигналов и блок выделения помехи, позволяющие посредством дуплексной радиосвязи с сервером автоматизированной системы управления сбором данных по помехам осуществлять выработку рекомендаций по текущей программной настройке приемников сигналов АЛСН.

В [48] для дешифрации кодовых сигналов АЛСН при нарушении цикловой синхронизации кодовых комбинаций вычисляется амплитудный спектр сигнала на выходе приемника с использованием дискретного преобразования Фурье, рассчитываются значения коэффициентов корреляции между амплитудным спектром принятого сигнала и амплитудными спектрами образцовых сигналов и по максимальному коэффициенту корреляции определяется принятый из рельсовой цепи кодовый сигнал. Этот же подход к дешифрации кодовых сигналов АЛСН использован в [49], где устройство приема и дешифрирования сигналов АЛСН помимо рассмотренного дешифратора содержит трехканальный приемник для определения, на какой именно несущей частоте из используемых в настоящее время (25, 50 или 75 Гц) и в какой кодировке (КПТ-5 и КПТ-7) ведется передача сигнала. Дальнейшее развитие многоканальная обработка сигнала получила в [50], где помехоустойчивая АЛСН содержит три модуля цифровой обработки сигналов по числу обрабатываемых частот 25, 50 и 75 Гц, а в каждом модуле имеется по два блока реконструкции сигнала, функционирующих в соответствии с кодовой комбинацией числового кода от соответствующего кодового путевого трансмиттера КПТ-5 и КПТ-7. Задача повышения надежности работы приемного устройства и обеспечения точности дешифрации числовых кодовых сигналов АЛСН при нарушении цикловой синхронизации кодовых комбинаций также решается в [51], но уже путем расчета коэффициентов корреляции поступающего с выхода приемника сигнала числового кода АЛСН, преобразуемого в последовательность бит, и хранящихся в блоке памяти образцовых двоичных сигналов числовых кодовых комбинаций с временным сдвигом относительно начала отсчета.

В [52] предлагается в приемнике вычислять автокорреляционную функцию принимаемого сигнала, по ней определяют энергетический спектр сигнала, при необходимости корректируют его, сдвигая по частоте, подавляют несущие в энергетических спектрах принятого и образцового сигналов, определяют значения коэффициентов корреляции между энергетическим спектром принятого сигнала и энергетическими спектрами образцовых сигналов, и по максимальному коэффициенту корреляции определяется принятый сигнал.

В [53] предлагается осуществлять компенсацию помех, возникающих на входе локомотивного приемника вследствие изменения подвеса катушек над рельсами во время движения по кривым. Для этого на локомотиве устанавливается компенсирующий трансформатор, а приемные катушки имеют основную и дополнительную одинаковые обмотки, которые включены как противоположные плечи моста, к диагоналям которого подключаются входные обмотки компенсирующего трансформатора, а его выходная обмотка подключена на вход локомотивного приемника.

В [54] для более эффективного подавления импульсных помех предлагается использовать нелинейное преобразование в виде бланкирования – полного прекращения приема на время действия импульсной помехи, причем порог бланкирования рассчитывается в зависимости от уровня принимаемого сигнала. Далее бланкирование применяется и в [55], дополняясь вычитающим устройством для компенсации гармонических помех. В [56] совместно с бланкированием, эффективным для подавления импульсных помех, для подавления гармонических помех от высоковольтных ЛЭП предлагается использовать блок нелинейного преобразования в виде блока с зоной нечувствительности. В [57] повышена эффективность работы блока с зоной нечувствительности за счет повышения точности расчета границы зоны нечувствительности. Применение блоков нелинейного преобразования для подавления помех получило дальнейшее развитие в [58], где для уменьшения искажений сигнала АЛСН в блоке бланкирования предложено при обнаружении бланкирования сигнала отключать блок бланкирования на время, достаточное для повышения порога бланкирования.

В [59] для повышения помехоустойчивости приемных устройств АЛС предлагается устройство, осуществляющее компенсацию мощных низкочастотных помех от постоянного или переменного тягового тока и неравномерной намагниченности рельсов путем выделения помех частотными фильтрами, их корректировки по амплитуде и фазе и последующего вычитания из входной смеси сигнала и помех. Решение по повышению устойчивости работы АЛСН при движении поездов на участках с высоким уровнем помех, т. е. по стрелочным путям станции, по кривым участкам, по намагниченным участкам пути, по рельсовым цепям с большой асимметрией предлагается в [60], для чего предполагается установка на локомотиве управляемых усилителей, блока суммирования и блока вычитания, а также блока сравнения, детекторов и ключей; в устройстве осуществляется выравнивание помех с выхода приемных катушек и их последующая компенсация на входе приемника.

Метод компенсации помех используется также в [61], согласно которому на локомотиве последовательно с типовыми катушками АЛС включаются две дополнительные компенсирующие катушки, расположенные над рельсовыми нитями вблизи типовых катушек, причем дополнительные катушки ориентированы на отсутствие магнитной связи с рельсовыми нитями при симметрии их расположения к рельсовым нитям, и на наличие магнитной связи при возникновении асимметрии тягового тока, боковой качке локомотива и воздействии остаточной намагниченности, при этом дополнительные катушки включены между собой согласно по отношению к наведенных в них ЭДС помехи от тягового тока и встречно по отношению к ЭДС помехи, наведенной в типовых катушках.

Для подавления импульсных помех на входе локомотивного приемника АЛС в [62] предлагается применить блок нелинейного преобразования в виде двухстороннего амплитудного ограничителя сигнала с задаваемым порогом ограничения, определяемым в соответствии с уровнем принимаемого сигнала посредством амплитудного детектора и интегратора.

В [63] для подавления импульсных помех, возникающих при дифференцировании за счет индуктивной связи между рельсами и локомотивными катушками, предлагается установка на локомотиве интегрирующего звена, на вход которого подключаются приемные катушки, а его выход подключается к входу локомотивного приемника. Авторами же [64] предлагается установка на локомотиве вместо приемных катушек двух датчиков Холла, в которых, в отличие от приемных катушек, не происходит дифференцирование сигнала и помехи и спектр импульсной помехи не изменяется, что позволяет избежать возникновения дополнительной помехи при наличии локомотивных катушек. Дальнейшее развитие эта идея получает в [65], где автор с целью компенсации помехи от асимметрии, вызванной различным положением датчиков Холла относительно оси ходового рельса, а также различной высотой их подвеса относительно уровня головки рельса при «боковой качке» подвижного состава, предлагает дополнительно установку третьего и четвертого датчиков Холла, которые попарно соединяются: первый с четвертым, второй с третьим последовательно и таким образом, что напряжения полезного сигнала от датчиков в паре складываются, а от помехи – вычтываются, и подключены на вход локомотивного приемника. Для снижения числа сбоев в работе бортовой аппаратуры АЛС при наличии асимметрии в канале индуктивной связи авторы [66] предлагают способ приема сигналов из линии индуктивной связи с компенсацией помехи от тягового тока и устройство для его осуществления, суть которых заключаются в том, что дополнительно непрерывно рассчитывают сумму коэффициента асимметрии помехи в линии индуктивной связи и коэффициента асимметрии геометрического положения и электрических параметров приемных катушек и/или датчиков Холла; измеряют электромагнитное поле вблизи проводника или проводников контактной сети; определяют уровень ЭДС компенсации помехи; вычтывают ее из суммы результирующих ЭДС помехи и полезного сигнала; результат передают на вход локомотивного приемника.

Авторами [67] для защиты устройств АЛС от аддитивных сосредоточенных помех предлагается способ, заключающийся в выделении из модулированного

сигнала АЛС двух сигналов, один из которых представляет собой сигнал с частотами нижней боковой полосы, а второй – сигнал с частотами верхней боковой полосы, выделенные сигналы детектируют и одновременно определяют среднюю мощность каждого выделенного сигнала, полученные значения средней мощности выделенных сигналов сравнивают между собой, по результатам сравнения сигнал с меньшей величиной средней мощности определяют как сигнал, не подверженный воздействию аддитивных сосредоточенных помех, который демодулируется приемником и передается в бортовую аппаратуру АЛС.

В [68] авторами предлагается компенсатор помех в гармоническом низкочастотном сигнале, обеспечивающий ослабление мощных помех от переменного тягового тока в рельсовых линиях, возникающих при сгущении потока поездов или движении тяжеловесных поездов, а также практически полное подавление помех на аппаратуру АЛС от магнитного поля рельсов, неравномерно намагниченных по их длине, посредством выделения помехи режекторным фильтром, ее инверсии инвертирующим трансформатором и вычитания из смеси сигнала и помехи в суммирующем трансформаторе.

Авторами изобретения [69] для повышения устойчивости работы локомотивных устройств АЛСН при действии стационарных и случайных (в т.ч. низкочастотных импульсных и квазинепрерывных) помех большой интенсивности на электрифицированных переменным током участках железных дорог предлагается формирование полезного сигнала на основании идентификации принятой кодовой посылки блоком принятия решения. Для этого применяются блоки расчета взаимнокорреляционной функции между принятым из рельсовой линии сигналом АЛС в виде смеси сигнал/шум и заданными опорными эталонными сигналами числовых кодов КЖ, Ж и З. При превышении уровня взаимнокорреляционной функции над установленным порогом, в блоке принятия решения определяется тип принятой кодовой посылки и происходит формирование соответствующего эталонного сигнала числового кода, который подается на исполнительное реле локомотивных приборов безопасности для его усиления и дешифрации.

В [70] автором для повышения помехоустойчивости приемного устройства АЛС при воздействии мощных помех от переменного тягового тока и от магнитного поля неравномерно намагниченных рельсов предлагается организовать два канала частотной фильтрации сигналов с частотами несущих 25 и 75 Гц соответственно, с автоматическим переключением на соответствующий канал в зависимости от частоты несущей принимаемого сигнала. С этой же целью в [71] предлагается замена аналогового локомотивного фильтра ФЛ-25/75М однополосным цифровым фильтром с уменьшенной с 14 до 8 Гц шириной полосы пропускания. Эффективность данного решения подтверждена авторами в работах [72, 73].

Анализ сущности предлагаемых решений показывает, что чаще всего в них применяются методы компенсации помех, теории оптимального приема сигналов (корреляционный прием сигналов, оптимальная частотная фильтрация), а также нелинейное преобразование сигнала.

Анализ особенностей технической реализации предлагаемых решений показывает, что их можно разделить на три группы:

- 1) решения, основанные на применении устанавливаемого на локомотиве оборудования (катушек, фильтров, трансформаторов и др.), без возможности их реализации путем изменения алгоритма функционирования имеющегося приемника сигналов АЛСН (5 патентов);
- 2) решения, основанные на изменении алгоритма функционирования приемника (16 патентов);
- 3) решения, основанные на применении устанавливаемого на локомотиве дополнительного оборудования, реализация которых возможна и путем изменения алгоритма функционирования приемника (7 патентов).

Для решений, предполагающих установку дополнительного оборудования на локомотиве, характерны следующие недостатки:

- сложность установки и последующей настройки дополнительного оборудования;

- усложнение оборудования АЛС, а следовательно, снижение его эксплуатационной надежности;
- увеличение затрат на техническое обслуживание локомотивных устройств безопасности.

Решения, заключающиеся в изменении алгоритма функционирования приемника сигналов АЛСН, образуют наиболее многочисленную группу. Реализация таких решений в цифровом приемнике путем модификации его программного обеспечения не имеет недостатков, характерных для решений из первой группы и позволяет применить решения, отнесенные к третьей группе.

Таким образом, анализ методов и технических решений по повышению помехоустойчивости локомотивного приемника канала АЛСН показывает, что чаще всего в них применяются положения теории оптимального приема сигналов (корреляционный прием сигналов, оптимальная частотная фильтрация), метод компенсации помех и нелинейное преобразование сигнала. Анализ особенностей технической реализации предлагаемых решений показывает, что наибольшее их количество основано на изменении алгоритма функционирования приемника, в то время как количество решений, предполагающих установку на локомотиве дополнительного оборудования, относительно мало. Результаты анализа позволили определить целесообразное направление дальнейшей работы – повышение помехоустойчивости приемника сигналов АЛСН путем изменения его алгоритма функционирования.

### **1.3 Анализ процесса распространения сигнала АЛСН по рельсовой линии**

Для обеспечения устойчивого функционирования канала АЛСН приемник должен осуществлять достоверный прием сигналов АЛСН, поступающих из рельсовой линии (РЛ). Сигнал АЛСН представляет собой амплитудно-манипулированное гармоническое колебание с частотой несущей 25, 50 или 75 Гц, т. е. последовательность радиоимпульсов низкой частоты.

Принимаемый на локомотиве сигнал АЛСН при отсутствии помех имеет вид

$$s(t) = a(t) \cdot A \cdot f(t) \cos[\omega_n t - \phi_n(t)], \quad (1.1)$$

где  $a(t)$  – множитель, характеризующий изменение амплитуды сигнала в ИРЛ (в процессе движения локомотива от приемного конца РЛ к передающему происходит увеличение  $a(t)$ );

$A$  – амплитуда сигнала на входе РЛ;

$f(t)$  – закон (функция) амплитудной манипуляции (огибающая кодового сигнала АЛСН – последовательность видеоимпульсов);

$\omega_n = 2\pi f_n$  – угловая частота колебаний несущей сигнала АЛСН;

$\phi_n(t)$  – фазовый сдвиг по несущей частоте сигнала на выходе РЛ относительно сигнала на входе РЛ.

На рисунке 1.6 представлены временные диаграммы функций  $f_j(t)$  амплитудной манипуляции сигналов АЛСН, формируемых кодовыми путевыми трансмиттерами КПТШ-5 (с длительностью кодового цикла 1,6 с) и КПТШ-7 (с длительностью кодового цикла 1,86 с).

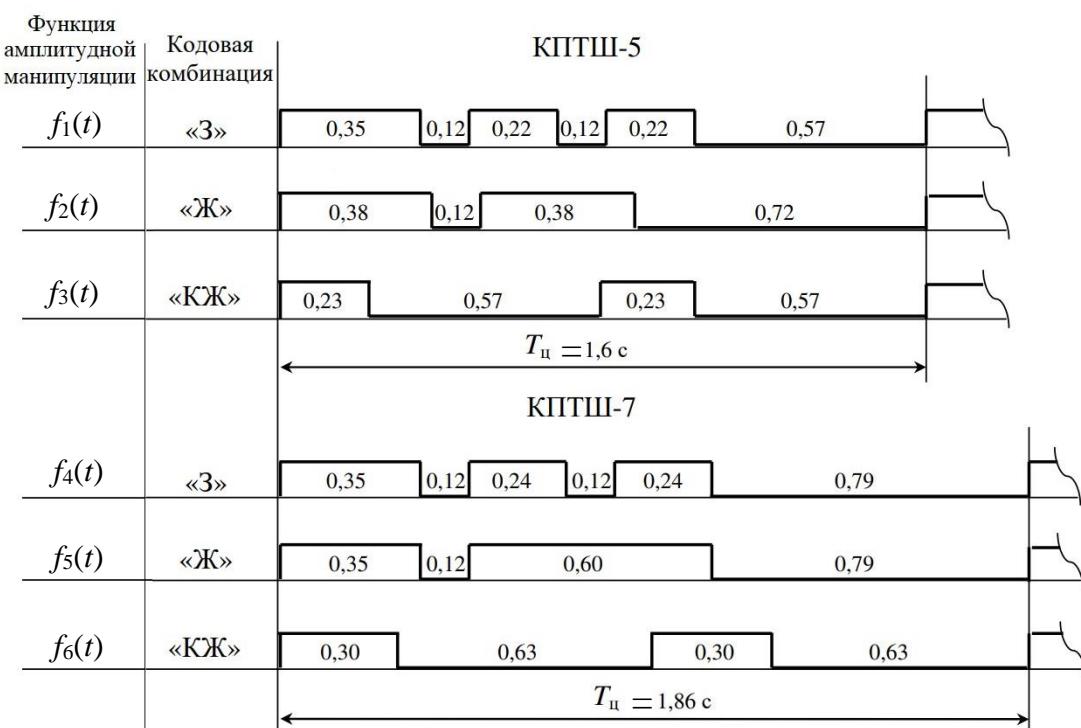


Рисунок 1.6 – Временные диаграммы функций  $f_j(t)$  амплитудной манипуляции сигналов АЛСН

РЛ представляет собой электрическую цепь с равномерно распределенными параметрами. Особенностью рельсовой линии является наличие несимметричной утечки тока в землю и непосредственно между рельсовыми нитями (РН) по верхнему слою балласта и шпалам [74].

Величины  $a(t)$  и  $\phi_n(t)$  в выражении (1.1) определяются первичными параметрами РЛ, ее длиной, частотой несущей сигнала АЛСН а также для конкретной рельсовой цепи (РЦ) зависят от ординаты поездного шунта, непрерывно изменяющейся во времени в процессе движения поезда.

При незначительных изменениях  $a(t)$  и  $\phi_n(t)$  от их минимального до их максимального значений при движении локомотива сигнал  $s(t)$  можно считать сигналом с постоянной амплитудой и начальной фазой. В противном случае  $s(t)$  следует считать сигналом со случайными амплитудой и начальной фазой. В зависимости от этого определяется структура оптимального приемника для обнаружения или различения сигналов.

Для определения структуры оптимального приемника сигналов АЛСН необходимо оценить диапазон возможных значений  $a(t)$  и  $\phi_n(t)$ , что приводит к необходимости анализа процесса распространения сигнала АЛСН в РЛ при движении поезда. Выполним данный анализ с использованием теории рельсовых цепей.

При расчете основных режимов РЛ представляют в виде электрической цепи, состоящей из трех проводов – двух рельсов и земли, рельсы обладают удельным продольным сопротивлением  $z_1, z_2$  и сопротивлением взаимной индуктивности  $z_m$ , удельное сопротивление земли как провода с очень большим сечением принимается равным нулю. Эти провода параллельно соединены между собой равномерно распределенными проводимостями изоляции  $g_1, g_2$  и  $g_{12}$ . Проводимость  $g_{12}$  характеризует величину тока утечки, проходящую как бы непосредственно из рельса в рельс по верхнему слою балласта и шпалам.

Схема замещения элемента  $dx$  РЛ изображена на рисунке 1.7, где:

$z_1, z_2$  – удельные сопротивления одиночных рельсов;

$z_m$  – сопротивление взаимоиндукции;

$g_1, g_2$  – удельные проводимости заземления РН;

$g_{12}$  – удельная проводимость верхнего слоя балласта и шпал;

$x$  – расстояние от конца рельсовой линии, где подключена нагрузка;

$\dot{I}_{1x}, \dot{I}_{2x}$  – соответственно токи в первой и второй РН с положительным

направлением от питающего конца к нагрузке;

$\dot{U}_{1x}, \dot{U}_{2x}$  – напряжение, соответственно, первой и второй РН относительно земли с положительным направлением от рельсов к земле.

Напряжения  $\dot{U}_{1x}$  и  $\dot{U}_{2x}$  определяются выражениями:

$$\dot{U}_{1x} = A_1 \operatorname{ch} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{sh} \gamma_1 x + A_3 \operatorname{ch} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{sh} \gamma_2 x; \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2x} = & \frac{\gamma_1^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} (A_1 \operatorname{ch} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{sh} \gamma_1 x) + \\ & + \frac{\gamma_2^2 - z_2(g_1 + g_{12}) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} (A_3 \operatorname{ch} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{sh} \gamma_2 x) \end{aligned}, \quad (1.3)$$

где  $\gamma_1$  – коэффициент распространения волны земляного тракта РЛ;

$\gamma_2$  – коэффициент распространения волны фазового тракта РЛ;

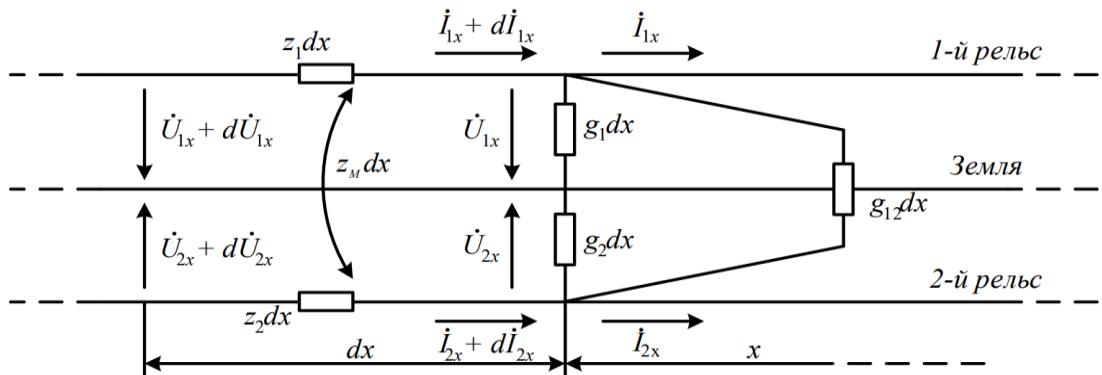


Рисунок 1.7 – Схема замещения элемента  $dx$  рельсовой линии

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{1}{2} a_1 - \sqrt{\frac{1}{4} a_1^2 - a_2}};$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{2} a_1 + \sqrt{\frac{1}{4} a_1^2 - a_2}},$$

где  $a_1 = g_{12}(z_1 + z_2 - 2z_m) + g_1z_1 + g_2z_2$ ,  $a_2 = (z_1z_2 - z_m^2)(g_1g_2 + g_1g_{12} + g_2g_{12})$ .

Токи в РН определяются выражениями

$$\dot{I}_{1x} = \gamma_1 \frac{z_2 - Mz_m}{z_1z_2 - z_m^2} (A_1 \operatorname{sh} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{ch} \gamma_1 x) + \gamma_2 \frac{z_2 - Nz_m}{z_{12} - z_m^2} (A_3 \operatorname{sh} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{ch} \gamma_2 x); \quad (1.4)$$

$$\dot{I}_{2x} = \gamma_1 \frac{Mz_1 - z_m}{z_1z_2 - z_m^2} (A_1 \operatorname{sh} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{ch} \gamma_1 x) + \gamma_2 \frac{Nz_1 - z_m}{z_1z_2 - z_m^2} (A_3 \operatorname{sh} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{ch} \gamma_2 x), \quad (1.5)$$

где  $M = \frac{\gamma_1^2 - z_1(g_1 + g_2) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}$ ,  $N = \frac{\gamma_2^2 - z_1(g_1 + g_2) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}$ .

Величины  $A_1, A_2, A_3$  и  $A_4$  в (1.2)-(1.5) являются постоянными интегрирования и находятся для каждой конкретной РЦ на основании граничных условий.

Схема замещения РЦ с локомотивным приемником в нормальном режиме приведена на рисунке 1.8. Как видно из схемы, РЛ длиной  $l$  состоит из двух участков  $l_1$  и  $l_2$  с различным изменением напряжения и тока вдоль РЛ.

На схеме сопротивление  $Z_{\text{нвх}}$  представляет собой входное сопротивление между средней точкой дроссель-трансформатора смежной РЦ и землей для РЦ, смежной с началом данной РЦ, а  $Z_{\text{квх}}$  – входное сопротивление между средней точкой дроссель-трансформатора смежной РЦ и землей для РЦ, смежной с концом данной РЦ.

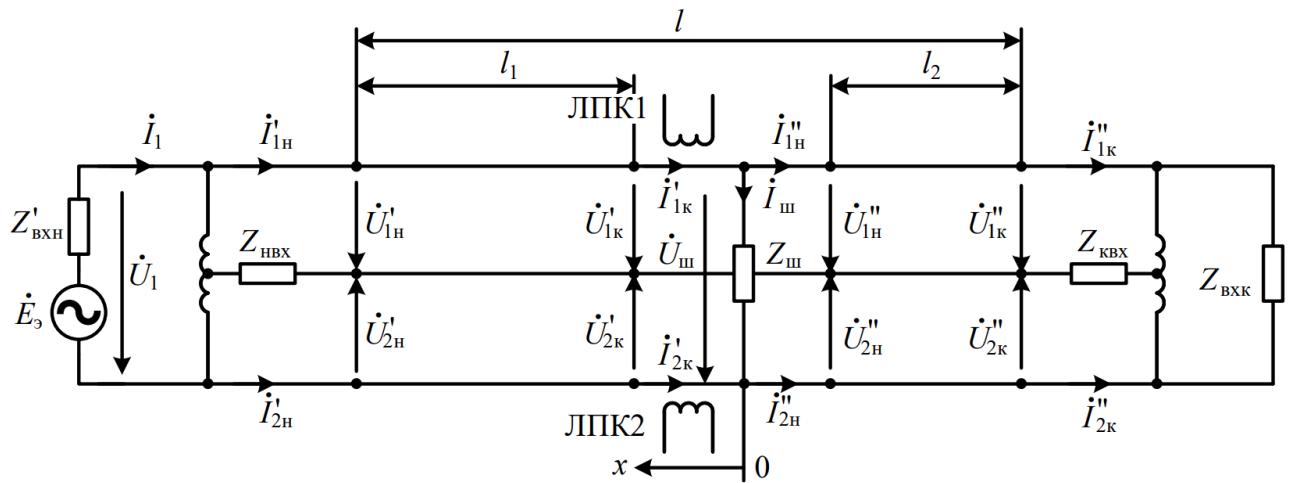


Рисунок 1.8 – Схема замещения РЦ с локомотивным приемником в нормальном режиме

На рисунке 1.8 использованы следующие обозначения:

$Z_{\text{ш}}$  – полное сопротивление поездного шунта;

$\dot{I}_{\text{ш}}$  и  $\dot{U}_{\text{ш}}$  – ток и напряжение на поездном шунте;

$\dot{I}_1$  и  $\dot{U}_1$  – ток и напряжение в начале РЛ;

$Z'_{\text{вхн}}$  – обратное входное сопротивление устройств согласования в начале РЛ при замкнутых накоротко зажимах источника сигнала;

$Z_{\text{вхк}}$  – входное сопротивление устройств согласования в конце рельсовой линии, на выходе которых подключен путевой приемник рельсовой цепи;

ЛПК1, ЛПК2 – локомотивные приемные катушки.

Положительные направления токов и напряжений показаны на рисунке 1.7, начало ординат располагается у места подключения локомотивного приемника.

Величины  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  для РЦ с локомотивным приемником в нормальном режиме определяются выражениями [74]:

$$\dot{U}_1 = B_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}}; \quad (1.6)$$

$$\dot{I}_1 = D_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}}, \quad (1.7)$$

где  $B_{\text{л}}$ ,  $D_{\text{л}}$  – коэффициенты рельсового четырехполюсника;

$\dot{I}_{\text{л}} = \frac{\dot{I}_{1\text{к}} - \dot{I}'_{2\text{к}}}{2}$  – средняя величина тока в рельсах под ЛПК.

В случае симметричных РЛ выражения для  $B_{\text{л}}$ ,  $D_{\text{л}}$  имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{л}} &= Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l_1 + \frac{Z_{\text{в}} Z_{\text{ш}} (Z_{\text{вхк}} \text{ch} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l_2) \text{ch} \gamma l_1}{(Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхк}} + Z_{\text{в}}^2) \text{sh} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхк}}) \text{ch} \gamma l_2}; \\ D_{\text{л}} &= \text{ch} \gamma l_1 + \frac{Z_{\text{ш}} (Z_{\text{вхк}} \text{ch} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l_2) \text{sh} \gamma l_1}{(Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхк}} + Z_{\text{в}}^2) \text{sh} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхк}}) \text{ch} \gamma l_2}, \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

где  $Z_{\text{в}}$  – волновое сопротивление симметричной РЛ.

В процессе движения локомотива вдоль РЛ от ее конца к ее началу расстояния  $l_1$  и  $l_2$  непрерывно изменяются.

В момент вступления головы локомотива на конец РЛ ( $l_2 = 0$ ,  $l_1 = l$ ) выражения для  $B_{\text{л}}$  и  $D_{\text{л}}$  примут вид

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{л}} &= Z_{\text{в}} \operatorname{sh} \gamma l + \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхк}}}{Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхк}}} \operatorname{ch} \gamma l; \\ D_{\text{л}} &= \frac{1}{Z_{\text{в}}} \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхк}}}{Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхк}}} \operatorname{sh} \gamma l + \operatorname{ch} \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

В момент проездом головы локомотива точки подключения передающей аппаратуры канала АЛСН к РЛ ( $l_1 = 0, l_2 = l$ ) выражения для  $B_{\text{л}}$  и  $D_{\text{л}}$  примут вид

$$B_{\text{л}} = \frac{Z_{\text{в}} Z_{\text{ш}} (Z_{\text{вхк}} \operatorname{ch} \gamma l + Z_{\text{в}} \operatorname{sh} \gamma l)}{(Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхк}} + Z_{\text{в}}^2) \operatorname{sh} \gamma l + Z_{\text{в}} (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхк}}) \operatorname{ch} \gamma l}; \quad D_{\text{л}} = 1.$$

В выражении (1.1) величину  $a(t)$  можно представить как

$$a(t) = \left| \frac{\dot{E}_{\text{л}}(t)}{\dot{E}_{\text{л.к}}} \right|,$$

где  $\dot{E}_{\text{л}}(t)$  – ЭДС на выходе ЛПК, изменяющаяся во времени в процессе движения локомотива вдоль РЛ;

$\dot{E}_{\text{л.к}}$  – ЭДС на выходе ЛПК в момент вступления локомотива на приемный конец РЦ.

ЭДС на выходе одной ЛПК определяется выражением [75]

$$\dot{E}_{\text{л}}(t) = -M(t) \frac{d\dot{I}_{\text{л}}(t)}{dt} - \dot{I}_{\text{л}}(t) \frac{dM(t)}{dt}, \quad (1.10)$$

где  $M(t)$  – взаимная индуктивность между ЛПК и РН.

Дальнейший анализ будем проводить, основываясь на следующих допущениях:

- локомотив движется по прямолинейному участку пути с неразветвленной РЛ;
- боковая качка и галопирование кузова локомотива отсутствуют;
- отсутствуют асимметрия подвеса ЛПК над уровнем головки рельса и асимметрия их электрических и магнитных параметров;
- отсутствуют внешние помехи.

В этом случае взаимная индуктивность между ЛПК и РН является величиной постоянной и выражение (1.10) приходит к виду

$$\dot{E}_{\text{л}}(t) = -M \frac{d\dot{I}_{\text{л}}(t)}{dt},$$

т. е. изменение ЭДС на выходе ЛПК пропорционально изменению тока в РН под ЛПК. Тогда можно записать

$$a(t) = \left| \frac{\dot{I}_{\text{л}}(t)}{\dot{I}_{\text{л.к}}} \right|, \quad (1.11)$$

где  $\dot{I}_{\text{л.к}}$  – средняя величина тока в рельсовых нитях под ЛПК в момент нахождения локомотива в конце РЛ.

Аналогичными рассуждениями приходим к выводу, что величину  $\varphi_{\text{н}}(t)$  в выражении (1.1) можно определить как

$$\varphi_{\text{н}}(t) = \varphi_{\dot{I}_{\text{л}}}(t) - \varphi_{\dot{I}_{\text{л.к}}}, \quad (1.12)$$

где  $\varphi_{\dot{I}_{\text{л}}}(t)$  – фаза колебания тока  $\dot{I}_{\text{л}}$ , изменяющаяся в процессе движения локомотива вдоль РЛ;

$\varphi_{\dot{I}_{\text{л.к}}}$  – фаза колебания тока  $\dot{I}_{\text{л}}$  в момент нахождения локомотива в конце РЛ.

В выражениях (1.11) и (1.12) от переменной  $t$  можно перейти к однозначно связанной с ней переменной  $x$  – ординате поездного шунта.

В результате приходим к зависимостям

$$a(x) = \left| \frac{\dot{I}_{\text{л}}(x)}{\dot{I}_{\text{л.к}}} \right|, \quad (1.13)$$

$$\varphi_{\text{н}}(x) = \arg(\dot{I}_{\text{л}}(x)) - \arg(\dot{I}_{\text{л.к}}) \quad (1.14)$$

Поскольку фаза гармонического колебания является относительным параметром, а в выражении (1.14) нас интересует не абсолютное значение фазы, а ее изменение (сдвиг) в ординате  $x$  относительно значения в конце РЛ (при  $x = 0$ ), то можно положить  $\arg(\dot{I}_{\text{л.к}}) = 0$  и, соответственно, получаем

$$\varphi_{\text{н}}(x) = \arg(\dot{I}_{\text{л}}(x)). \quad (1.15)$$

Оценим диапазон изменения значений  $a(x)$  и  $\varphi_{\text{н}}(x)$  в процессе движения локомотива вдоль РЛ (при изменении ординаты  $x$ ).

Согласно [74], величина  $\dot{I}_{\text{л}}$  определяется выражением

$$\dot{I}_{\text{л}} = \frac{\dot{E}_{\text{з}}}{Z_{\text{лпо}}}, \quad (1.16)$$

где  $\dot{E}_s$  – ЭДС эквивалентного генератора;

$Z_{\text{лпо}}$  – сопротивление передачи основной схемы замещения РЦ с локомотивным приемником.

ЭДС эквивалентного генератора можно определить через напряжение  $\dot{U}_{\text{ист}}$  источника сигнала АЛСН:

$$\dot{E}_s = \frac{\dot{U}_{\text{ист}}}{A_h}, \quad (1.17)$$

где  $A_h$  – коэффициент четырёхполюсника  $N_h$ , замещающего устройство согласования в начале РЦ.

Напряжение  $\dot{U}_{\text{ист}}$  определяется выражением

$$\dot{U}_{\text{ист}} = A_h \dot{U}_1 + B_h \dot{I}_1, \quad (1.18)$$

где  $B_h$  – коэффициент четырёхполюсника  $N_h$ , замещающего устройство согласования в начале РЦ.

Тогда (1.17) примет вид

$$\dot{E}_s = \frac{A_h \dot{U}_1 + B_h \dot{I}_1}{A_h} = \dot{U}_1 + \frac{B_h \dot{I}_1}{A_h} = \dot{U}_1 + Z'_{\text{вхн}} \dot{I}_1, \quad (1.19)$$

где  $Z'_{\text{вхн}} = \frac{B_h}{A_h}$  – обратное входное сопротивление аппаратуры в начале РЛ.

В (1.19) величины  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  можно определить из (1.6) и (1.7) для случая, когда  $l_2 = 0$ ,  $l_1 = l$  (поездной шунт находится в конце РЛ). Согласно [76], при электротяге постоянного тока минимальный расчетный ток  $\dot{I}_{\text{л.к min}}$  под ЛПК в конце РЛ (через шунт, накладываемый на входной конец РЦ) при частоте сигнального тока 50 Гц должен быть не менее 2 А (принимаем наихудшее значение  $\dot{I}_{\text{л.к min}} = 2$  А). Значения коэффициентов  $B_{\text{л}}$  и  $D_{\text{л}}$  в данном случае будут определяться по (1.9). Тогда из (1.6), (1.7) и (1.9) получаем

$$\dot{U}_1 = \left( Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l + \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхн}}}{Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхн}}} \text{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{\text{л.к min}}; \quad (1.20)$$

$$\dot{I}_1 = \left( \frac{1}{Z_{\text{в}}} \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{вхн}}}{Z_{\text{ш}} + Z_{\text{вхн}}} \text{sh} \gamma l + \text{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{\text{л.к min}}. \quad (1.21)$$

Соответственно, выражение (1.19) примет вид

$$\dot{E}_3 = \left( Z_B \operatorname{sh} \gamma l + \frac{Z_{III} Z_{BHK}}{Z_{III} + Z_{BHK}} \operatorname{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{\text{л.к min}} + Z'_{BHK} \left( \frac{1}{Z_B} \frac{Z_{III} Z_{BHK}}{Z_{III} + Z_{BHK}} \operatorname{sh} \gamma l + \operatorname{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{\text{л.к min}}. \quad (1.22)$$

В выражении (1.16) сопротивление передачи основной схемы замещения РЦ с локомотивным приемником определяется выражением

$$Z_{\text{лло}}(x) = D_{\text{л}}(x) \cdot Z'_{BHK} + B_{\text{л}}(x), \quad (1.23)$$

где коэффициенты  $D_{\text{л}}(x)$  и  $B_{\text{л}}(x)$  являются функциями ординаты  $x$  поездного шунта, связанной с длинами  $l_1$  и  $l_2$  участков РЛ выражениями  $l_1 = l - x$  и  $l_2 = x$ .

В соответствии с (1.8) функции  $B_{\text{л}}(x)$  и  $D_{\text{л}}(x)$  имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{л}}(x) &= Z_B \operatorname{sh} \gamma l_1(x) + \frac{Z_B Z_{III} (Z_{BHK} \operatorname{ch} \gamma l_2(x) + Z_B \operatorname{sh} \gamma l_2(x)) \operatorname{ch} \gamma l_1(x)}{(Z_{III} Z_{BHK} + Z_B^2) \operatorname{sh} \gamma l_2(x) + Z_B (Z_{III} + Z_{BHK}) \operatorname{ch} \gamma l_2(x)}; \\ D_{\text{л}}(x) &= \operatorname{ch} \gamma l_1(x) + \frac{Z_{III} (Z_{BHK} \operatorname{ch} \gamma l_2(x) + Z_B \operatorname{sh} \gamma l_2(x)) \operatorname{sh} \gamma l_1(x)}{(Z_{III} Z_{BHK} + Z_B^2) \operatorname{sh} \gamma l_2(x) + Z_B (Z_{III} + Z_{BHK}) \operatorname{ch} \gamma l_2(x)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

Тогда в соответствии с (1.16) и с учетом (1.23) зависимость  $\dot{I}_{\text{л}}(x)$  будет иметь вид:

$$\dot{I}_{\text{л}}(x) = \frac{\dot{E}_3}{D_{\text{л}}(x) \cdot Z'_{BHK} + B_{\text{л}}(x)}. \quad (1.25)$$

Полученная зависимость (1.25) позволяет определять амплитуду и фазу тока в РН под ЛПК при любой ординате  $x$  поездного шунта, что может быть полезным при решении задач анализа изменения во времени параметров сигнала АЛСН, принимаемого на локомотиве в процессе его движения.

Для получения выражения зависимости  $a(x)$  подставим в (1.13) выражение (1.25), учитя, что в знаменателе дроби  $\dot{I}_{\text{л.к}} = \dot{I}_{\text{л.к min}}$ . Получаем

$$a(x) = \left| \frac{\dot{E}_3}{\dot{I}_{\text{л.к min}} [D_{\text{л}}(x) \cdot Z'_{BHK} + B_{\text{л}}(x)]} \right|. \quad (1.26)$$

Зависимость (1.15) с учетом (1.25) примет вид

$$\varphi_{\text{н}}(x) = \arg \left( \frac{\dot{E}_3}{D_{\text{л}}(x) \cdot Z'_{BHK} + B_{\text{л}}(x)} \right). \quad (1.27)$$

Выполним в соответствии с полученным выражениями (1.26) и (1.27) расчеты и построим графики зависимостей  $a(x)$  и  $\varphi_h(x)$  для числовых кодовых рельсовых цепей с  $f_h = 50$  Гц (при электротяге постоянного тока) и РЛ длиной 1 и 2,6 км. Пример расчета такой РЦ длиной 2,6 км в различных режимах работы представлен в [77]. В расчетах используем коэффициенты ЧП начала РЦ, которые для направления расчета от приемника к источнику сигнала АЛСН имеют значения:

$$\begin{vmatrix} A_h & B_h \\ C_h & D_h \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 16,424e^{0,78j} & 4,81e^{80,78j} \\ 0,031e^{31,05j} & 0,067e^{5,23j} \end{vmatrix}.$$

Расчеты выполним при значениях сопротивления изоляции РЛ:  $r_{i1} = 0,5$  Ом·км (при влажном балласте [78]);  $r_{i2} = 1$  Ом·км (расчетное сопротивление изоляции);  $r_{i3} = 50$  Ом·км (при сухом или слабо промерзшем балласте) [79, 80].

Графики зависимостей (1.26) и (1.27), полученные в результате расчетов, представлены на рисунках 1.9 и 1.10 соответственно.

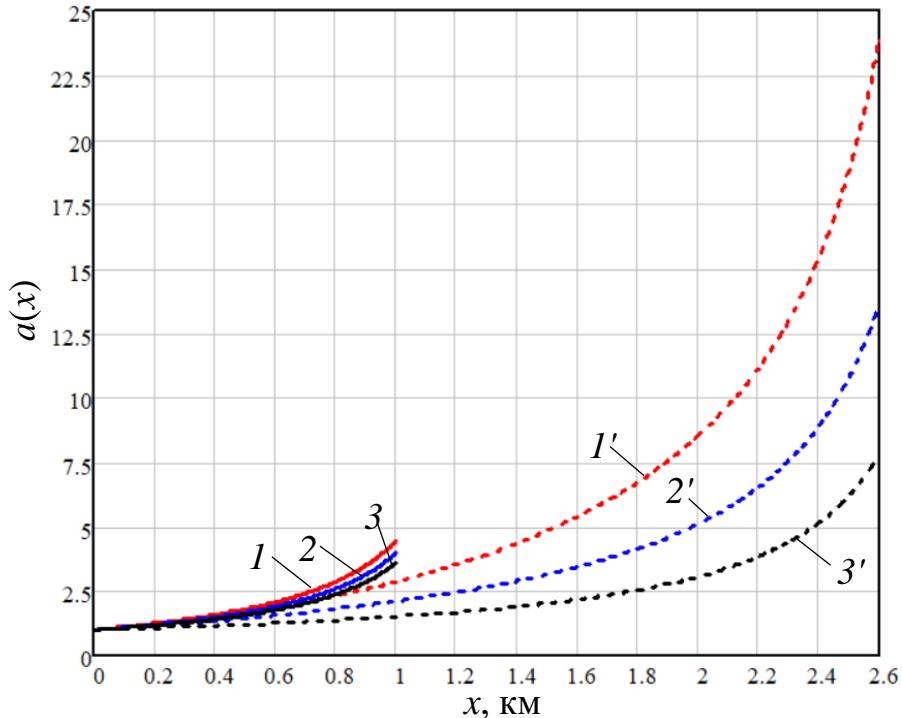


Рисунок 1.9 – Графики зависимости  $a(x)$ :

- 1, 1' – при  $r_{i1} = 0,5$  Ом·км и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно;
- 2, 2' – при  $r_{i2} = 1$  Ом·км и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно;
- 3, 3' – при  $r_{i3} = 50$  Ом·км и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно

Расчеты и графики, представленные на рисунке 1.9, показывают, что в процессе движения поезда величина  $a(x)$  изменяется в 3,6-4,4 раза (при длине РЛ 1 км и  $r_i = 50-0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  соответственно), а при длине РЛ 2,6 км – в 7,8-24 раза соответственно при тех же значениях  $r_i$ . Это говорит о существенной зависимости  $a(x)$  от длины РЛ и сопротивления изоляции РЛ, являющихся в процессе движения поезда по участку железнодорожного пути случайными величинами. Таким образом сигнал АЛСН можно считать сигналом со случайной амплитудой.

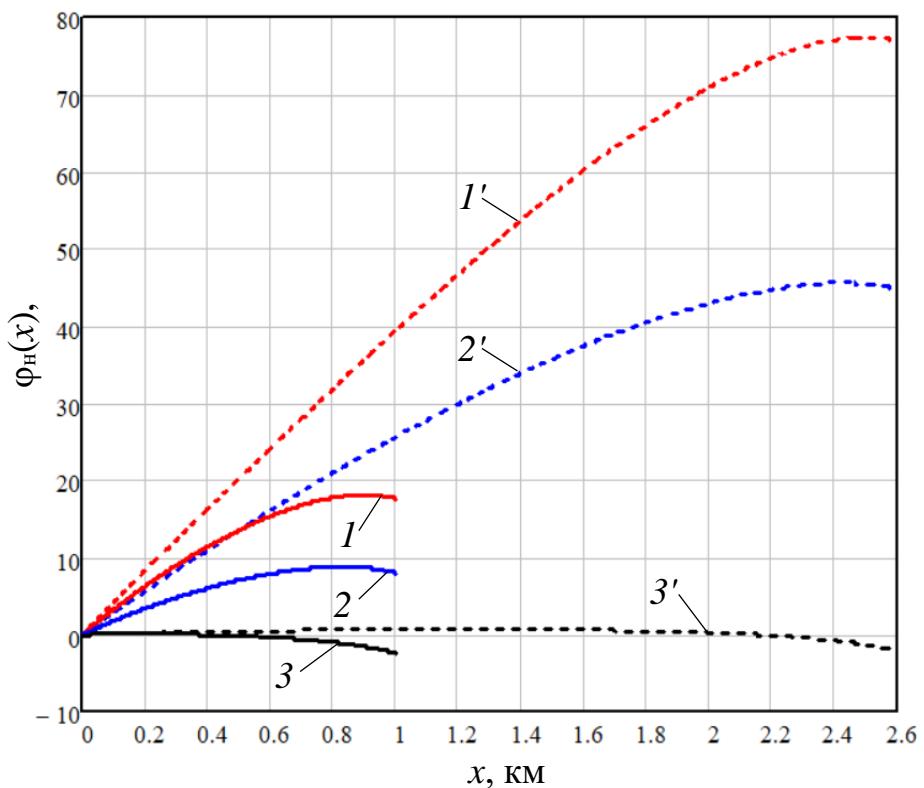


Рисунок 1.10 – Графики зависимости  $\phi_h(x)$ :

- 1, 1' – при  $r_{i1} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно;
- 2, 2' – при  $r_{i2} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно;
- 3, 3' – при  $r_{i3} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно

Анализ графиков, представленных на рисунке 1.10, показывает, что при движении поезда фазовый сдвиг  $\phi_h(x)$  колебания несущей сигнала в рельсах под ЛПК относительно фазы этого же колебания на входе РЛ может изменяться от минус  $2,37^\circ$  до  $18,15^\circ$  (при длине РЛ 1 км и  $r_i = 0,5$  и  $50 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  соответственно), а

при длине РЛ 2,6 км – от минус  $2,09^\circ$  до  $77,46^\circ$  соответственно при тех же значениях  $r_i$ . Кроме того, имеется существенная зависимость величины фазового сдвига от сопротивления изоляции РЛ. Следовательно, сигнал АЛСН на входе локомотивного приемника можно считать сигналом со случайной фазой.

Таким образом, анализ процесса распространения сигнала АЛСН в РЛ дает основания считать его сигналом со случайными амплитудой и начальной фазой существенно зависящими от длины РЛ и сопротивления ее изоляции. Данное обстоятельство следует учитывать при определении структуры оптимального приемника сигналов АЛСН, и следовательно, решении задачи повышения его помехоустойчивости.

#### **1.4 Выводы по первой главе**

1. Анализ сбоев в работе АЛСН показал, что помехи в канале АЛСН, вызывая до 18,5 % от всех принятых к учету сбоев, являются одной из важнейших причин их возникновения. Значительное влияние на устойчивость функционирования АЛСН оказывают помехи от тягового тока при наличии асимметрии индуктивно-рельсовой линии и помехи, вызванные неравномерной намагниченностью рельсов. Следовательно, актуальны работы по повышению устойчивости функционирования АЛСН в условиях действия помех.

2. Целесообразным представляется снижение числа сбоев в работе АЛСН путем повышения помехоустойчивости локомотивного приемника, поскольку потребует существенно меньшего объема организационно-технических мероприятий по сравнению с повышением надежности локомотивных устройств АЛСН, повышением качества технического содержания верхнего строения пути и модернизацией передающей аппаратуры канала АЛСН, также позволяющих снизить число сбоев.

3. Результаты анализа методов и технических решений по повышению помехоустойчивости приемника канала АЛСН показывают, что наиболее перспективными с точки зрения эффективности применения, простоты реализации

и внедрения представляются решения, основанные на положениях теории оптимального приема, нелинейном преобразовании сигнала и компенсации помех, причем реализуемые посредством цифровой обработки сигналов АЛСН в микропроцессорном приемнике. Такие решения не снижают надежность аппаратуры локомотивных устройств безопасности, не требуют индивидуальной настройки на локомотиве и не увеличивают затраты на их техническое содержание.

4. Полученная зависимость  $\dot{I}_\text{л}(x)$  позволяет определять амплитуду и фазу тока в РН под ЛПК при любой ординате  $x$  поездного шунта, что может быть полезным при решении задач анализа изменения по ординате или во времени параметров сигнала АЛСН, принимаемого на локомотиве в процессе его движения.

5. В процессе движения поезда амплитуда сигнала АЛСН может изменяться в 3,6 раза (при  $r_\text{и} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  и длине РЛ 1 км) – 24 раза (при  $r_\text{и} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$  и длине РЛ 2,6 км), а фазовый сдвиг – от минус  $2,37^\circ$  до  $77,46^\circ$  при тех же условиях. Следовательно, задачу приема сигналов АЛСН на локомотиве следует рассматривать как задачу различения радиосигналов со случайными амплитудой и начальной фазой, существенно зависящими от длины РЛ и сопротивления ее изоляции, что необходимо учитывать при определении структуры оптимального приемника сигналов АЛСН.

## 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ АЛСН

### 2.1 Потенциальные возможности оптимального приема сигналов АЛСН

Приемник, для которого искажения сообщений в определенном смысле минимальны, называется оптимальным или идеальным (наилучшим) в этом смысле [36]. В зависимости от назначения приемника критерии и количественные характеристики искажений могут быть разными. При выбранном критерии и заданных условиях приема оптимальный приемник определяет минимальные искажения сообщения. Этот минимальный уровень искажений часто называют потенциальной помехоустойчивостью.

Назначение приемника сигналов АЛСН – достоверный прием на локомотиве передаваемых сообщений о сигнальном показании напольного светофора. В канале АЛСН критерием искажения передаваемого сообщения (кодируемого кодовой комбинацией «З», «Ж» или «КЖ») является его потеря или трансформация в другое сообщение, что приводит к несоответствию сигнального показания локомотивного светофора показанию напольного светофора, т.е. к сбою в работе АЛСН. Причиной искажения передаваемого сообщения является искажение помехами принимаемого на локомотиве сигнала АЛСН. Таким образом, для уменьшения числа сбоев необходимо повысить достоверность различия сигналов АЛСН, соответствующих кодовым комбинациям «З», «Ж» и «КЖ». Следовательно, критерием оптимальности локомотивного приемника сигналов АЛСН является достоверность различия сигналов АЛСН в условиях действия помех.

Из [36, 81, 82] известно, что задача различия сигналов со случайными амплитудой и начальной фазой (какими являются сигналы АЛСН) оптимальным образом решается посредством многоканального приемника, содержащего согласованные фильтры, или корреляционного приемника с квадратурными каналами. Функциональная схема оптимального (согласно [36]) корреляционного

приемника, решающего задачу различения сигналов АЛСН, представлена на рисунке 2.1. Данная схема реализует так называемый «прием в целом», когда решение о передаваемом сообщении принимается путем анализа всего сигнала (не менее одного кодового цикла) без выделения отдельных структурных элементов сигнала (элементарных сигналов – импульсов и интервалов кодового сигнала АЛСН, соответствующих элементам передаваемой кодовой комбинации). Назначение данного оптимального приемника состоит не в наилучшем воспроизведении формы принимаемого сигнала АЛСН, а в формировании на своем выходе напряжения сигнала с максимальным отношением сигнал/помеха в момент времени  $t = T$ , соответствующего окончанию анализируемого кодового цикла (кодовых циклов) принимаемого сигнала, и определении напряжения с наибольшим значением.

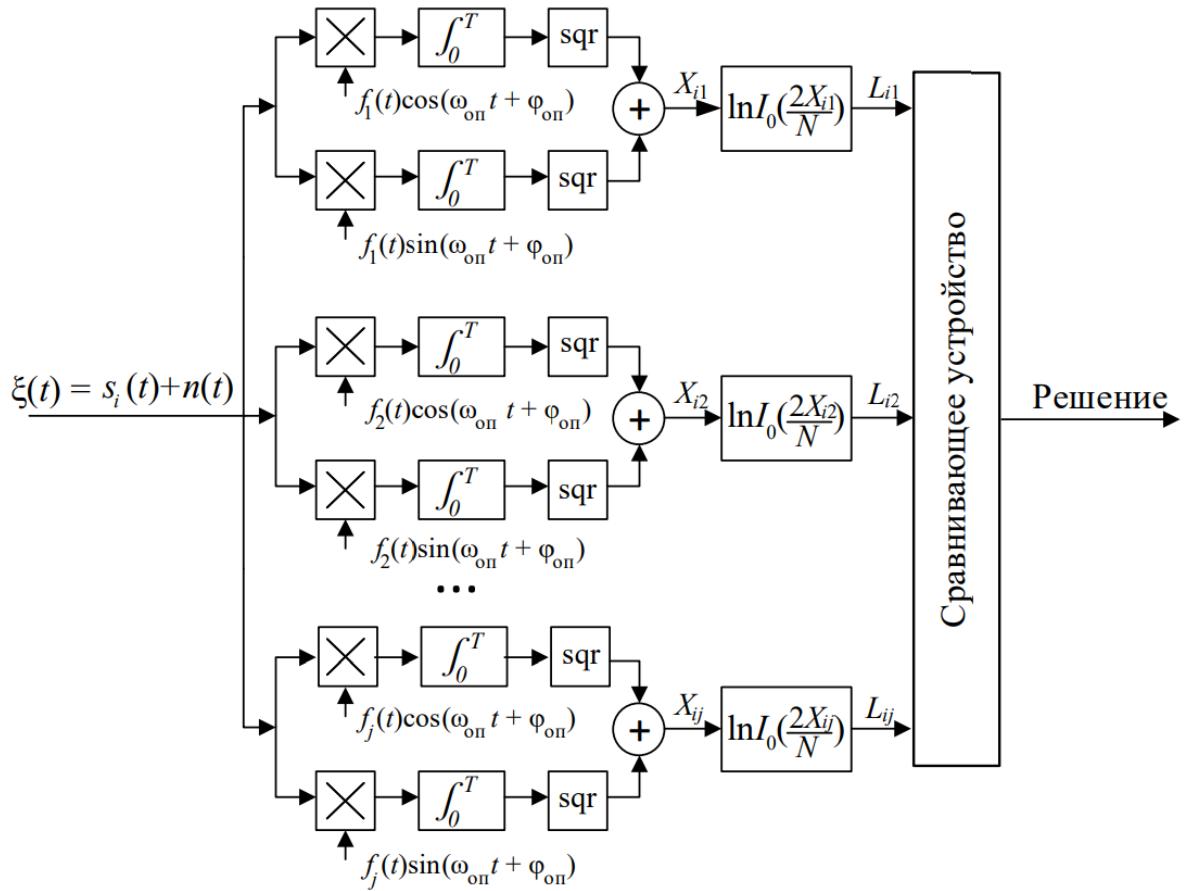


Рисунок 2.1 – Функциональная схема оптимального корреляционного приемника для различения сигналов АЛСН

Кроме «приема в целом» возможен и поэлементный прием сигнала АЛСН, осуществляемый путем выделения элементов сигнала (импульсов и интервалов) и последующего подсчета количества импульсов в одном цикле принимаемого сигнала. Потенциально, «прием в целом» может обеспечить более высокую достоверность приема за счет использования дополнительной информации о структуре принимаемого сигнала, определяемого передаваемой кодовой комбинацией.

В функциональной схеме оптимального корреляционного приемника (рисунок 2.1) на его вход из ИРЛ поступает колебание  $\xi(t)$ , являющееся случайной функцией от полезного сигнала  $s_i(t)$  и помехи  $n(t)$ . В каждом из шести каналов приемника в их квадратурных каналах на выходах интеграторов формируются квадратурные составляющие  $X_{ij\,c}$  и  $X_{ij\,s}$  в соответствии с выражениями

$$X_{ij\,c} = \int_0^T \xi(t) f_j(t-\tau) \cos(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}}(t-\tau)) dt, \quad (2.1)$$

$$X_{ij\,s} = \int_0^T \xi(t) f_j(t-\tau) \sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}}(t-\tau)) dt, \quad (2.2)$$

где  $\tau$  – сдвиг во времени начала цикла опорного (эталонного) сигнала  $f_j(t)$  относительно начала цикла принимаемого колебания  $\xi(t)$ ;

$\omega_{\text{оп}}$ ,  $\varphi_{\text{оп}}$  – соответственно угловая частота и начальная фаза опорных колебаний  $\cos(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}})$  и  $\sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}})$ , формируемых в приемнике.

На выходах сумматоров формируются положительные функции  $X_{ij}$ :

$$X_{ij} = \sqrt{X_{ij\,c}^2 + X_{ij\,s}^2} \geq 0. \quad (2.3)$$

Физически величина  $X_{ij}$  представляет собой значение огибающей суммы сигнала  $s_i(t)$  и помехи  $n(t)$  в момент времени  $t = T$  на выходе согласованного фильтра, имеющего импульсную характеристику

$$h_i(t) = \begin{cases} s_i(T-t) & \text{при } 0 \leq t \leq T, \\ 0 & \text{при } t < 0, t > T. \end{cases}$$

Величина

$$L_{ij} = \ln I_0(2X_{ij}/N) \quad (2.4)$$

представляет собой логарифмическую функцию правдоподобия на выходе детектора огибающей с законом  $\ln I_0(x)$ . Здесь  $N$  – спектральная плотность мощности белого шума на входе приемника, Вт/Гц.

Сравнивающее устройство принимает решение о принятом сигнале  $s_i(t)$  по функции  $L_{ij}$  с максимальным значением.

В канале АЛСН при реализации оптимального приемника по схеме, представленной на рисунке 2.1, сложность представляет формирование функций  $f_j(t)$  ( $j = \overline{1,6}$ ), представляющих собой эталонные огибающие сигналов кодовых комбинаций АЛСН (см. рисунок 1.6).

Функции амплитудной манипуляции  $f_j(t)$  в соответствии с рисунком 1.6 можно представить кусочно-линейными функциями:

$$f_1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,35 \text{ с; } 0,47 \text{ с} \leq t < 0,69 \text{ с; } 0,81 \text{ с} \leq t < 1,03 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,35 \text{ с} \leq t < 0,47 \text{ с; } 0,69 \text{ с} \leq t < 0,81 \text{ с; } 1,03 \text{ с} \leq t < 1,60 \text{ с;} \end{cases}$$

$$f_2(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,38 \text{ с; } 0,50 \leq t < 0,88 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,38 \text{ с} \leq t < 0,50 \text{ с; } 0,88 \leq t < 1,60 \text{ с;} \end{cases}$$

$$f_3(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,23 \text{ с; } 0,80 \text{ с} \leq t < 1,03 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,23 \text{ с} \leq t < 0,80 \text{ с; } 1,03 \text{ с} \leq t < 1,60 \text{ с;} \end{cases}$$

$$f_4(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,35 \text{ с; } 0,47 \text{ с} \leq t < 0,71 \text{ с; } 0,83 \text{ с} \leq t < 1,07 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,35 \text{ с} \leq t < 0,47 \text{ с; } 0,71 \text{ с} \leq t < 0,83 \text{ с; } 1,07 \text{ с} \leq t < 1,86 \text{ с;} \end{cases}$$

$$f_5(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,35 \text{ с; } 0,47 \text{ с} \leq t < 1,07 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,35 \text{ с} \leq t < 0,47 \text{ с; } 1,07 \text{ с} \leq t < 1,86 \text{ с;} \end{cases}$$

$$f_6(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,30 \text{ с; } 0,93 \text{ с} \leq t < 1,23 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,30 \text{ с} \leq t < 0,93 \text{ с; } 1,23 \text{ с} \leq t < 1,86 \text{ с.} \end{cases}$$

Присвоим условно всем кодовым комбинациям АЛСН порядковые номера от одного до шести следующим образом:

Кодовая комбинация	Порядковый номер	Условное обозначение
«З» длительностью 1,6 с	1	«З <sub>1,6</sub> »
«Ж» длительностью 1,6 с	2	«Ж <sub>1,6</sub> »
«КЖ» длительностью 1,6 с	3	«КЖ <sub>1,6</sub> »
«З» длительностью 1,86 с	4	«З <sub>1,86</sub> »
«Ж» длительностью 1,86 с	5	«Ж <sub>1,86</sub> »
«КЖ» длительностью 1,86 с	6	«КЖ <sub>1,86</sub> »

Тогда при расчете значений  $X_{ij}$  в соответствии с выражениями (2.1) и (2.2) значения индекса  $i = \overline{1,6}$  представляют собой порядковый номер функции амплитудной манипуляции **принимаемого** сигнала, а  $j = \overline{1,6}$  – порядковый номер функции амплитудной манипуляции **опорного** сигнала.

Поскольку принимаемый сигнал АЛСН  $s_i(t)$  является циклически повторяющимся с длительностью  $T_{\text{п}}$  кодового цикла 1,6 или 1,86 с, функции  $f_j(t)$  также должны быть циклическими с той же длительностью кодового цикла. Причем для получения максимальных значений функции  $X_{ij}$  начала циклов принимаемого сигнала  $s_i(t)$  и сигналов  $f_j(t)$  должны совпадать во времени, т. е. должно выполняться условие  $\tau = 0$ . Таким образом, в приемнике необходима система цикловой синхронизации принимаемого сигнала  $s_i(t)$  и опорных (эталонных) сигналов  $f_j(t)\cos(\omega_{\text{оп}}t + \phi_{\text{оп}})$  и  $f_j(t)\sin(\omega_{\text{оп}}t + \phi_{\text{оп}})$ .

Оценим потенциальные возможности различения сигналов АЛСН оптимальным корреляционным приемником в предположении, что функция  $f_j(t)$  с точностью до постоянного множителя соответствует огибающей принимаемого сигнала АЛСН  $s_i(t)$  (идеальная цикловая синхронизация:  $\tau = 0$ ), а помехи отсутствуют. В этом случае различие в вычисляемых приемником значениях логарифмических функций правдоподобия  $L_{ij}$  при прочих равных условиях будет определяться структурой кодовых комбинаций АЛСН, а также несовпадением угловых частот и начальных фаз несущего колебания принимаемого сигнала АЛСН и опорных колебаний.

Интерес при оценке представляет рассмотрение следующих случаев:

- 1) угловая частота и начальная фаза опорных колебаний равна соответственно угловой частоте и начальной фазе несущего колебания принимаемого сигнала АЛСН:  $\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{н}}$ ,  $\phi_{\text{оп}} = \phi_{\text{н}}$  (идеальная подстройка опорных колебаний под принимаемое несущее колебание по частоте и фазе);
- 2) опорные и несущее колебания различаются по начальной фазе при одинаковой угловой частоте:  $\phi_{\text{оп}} - \phi_{\text{н}} = \Delta\phi \neq 0$ ,  $\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{н}}$  (расстройка опорных колебаний по фазе).

3) опорные и несущее колебания различаются по угловой частоте:  $\Delta\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{н}} \neq 0$  (расстройка опорных колебаний по частоте);

Рассмотрим данные случаи.

**Первый случай.** Для упрощения математических выкладок и наглядности результатов примем следующие допущения, не оказывающие принципиального влияния на получаемые результаты и выводы по ним:

1) амплитуда принимаемого сигнала  $A = 1$  В;

2) начальные фазы несущего и опорных колебаний равны нулю:

$$\Phi_{\text{оп}} = \Phi_{\text{н}} = 0.$$

С учетом данных допущений принимаемый сигнал АЛСН будет описываться выражением  $s_i(t) = f_j(t) \cos(\omega_{\text{оп}} t + \phi_{\text{оп}}), j = i$ .

Далее выполним расчеты значений логарифмической функции правдоподобия  $L_{ij}$  в соответствии с (2.1)-(2.4). В расчетах частота  $\omega_{\text{н}}$  несущей принимаемого сигнала АЛСН и частоты опорных колебаний  $\omega_{\text{оп}}$  приняты равными 50 Гц, мощность  $N$  белого шума принята равной  $10^{-2}$  Вт. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.2 в виде диаграммы значений функции правдоподобия  $L_{ij}$  при различных сочетаниях опорных и принимаемых сигналов (всего – 36 возможных сочетаний).

Согласно диаграмме, при приеме сигнала «З<sub>1,6</sub>» максимальное рассчитанное значение  $L_{1j_{\text{max}}}$  соответствует двум опорным сигналам:  $f_1(t)$  (сигнал «З<sub>1,6</sub>») и  $f_5(t)$  (сигнал «Ж<sub>1,86</sub>»). При приеме сигнала  $s_3(t)$  (сигнал «КЖ<sub>1,6</sub>») все шесть значений  $L_{3j}$  одинаковы. В целом же, при приеме сигналов четырех КК из шести (сигналы «З<sub>1,6</sub>», «КЖ<sub>1,6</sub>», «З<sub>1,86</sub>», «КЖ<sub>1,86</sub>») невозможно по рассчитанным значениям функции правдоподобия принять однозначное решение о передаваемой КК. Причиной этого является структура кодовых сигналов АЛСН, обладающих высокой взаимной корреляцией.

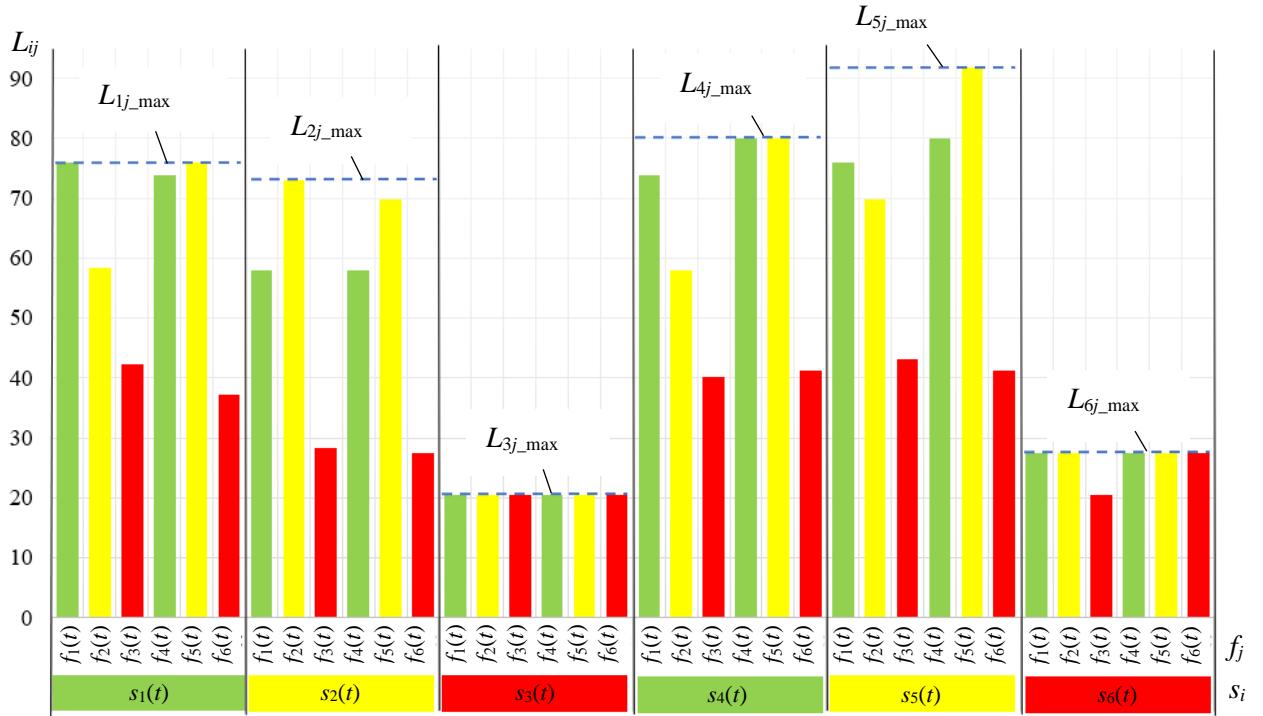


Рисунок 2.2 – Диаграмма значений функции правдоподобия при различных сочетаниях принимаемых и опорных сигналов

Таким образом, использование «приема в целом» не позволяет однозначно различать сигналы АЛСН даже в условиях идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации.

**Второй случай.** В приемнике генерируются копии всех возможных передаваемых сигналов АЛСН, но опорные и несущее колебания различаются по начальной фазе:  $\phi_{\text{оп}} - \phi_{\text{н}} \neq 0$ .

Для определения чувствительности функции правдоподобия  $L_{ij}$  к несовпадению фаз опорных и несущего колебаний выполним расчет ее значений в соответствии с выражениями (2.1)-(2.4), в которых значение  $\phi_{\text{н}}$  будем изменять в диапазоне от  $0$  до  $350^\circ$  с шагом  $10^\circ$ , а  $\phi_{\text{оп}} = 0$ .

Расчеты показывают, что при любых задаваемых значениях  $\phi_{\text{н}}$  рассчитанные значения  $L_{ij}$  равны значениям, ранее представленным на рисунке 2.2. Это позволяет сделать вывод, что корреляционный приемник, функциональная схема которого представлена на рисунке 2.1, инвариантен к начальной фазе колебания несущей принимаемого сигнала.

**Третий случай.** В корреляционном приемнике генерируются копии всех возможных передаваемых сигналов АЛСН с угловой частотой опорных колебаний, отличающейся от угловой частоты несущего колебания принимаемого сигнала:  $\Delta\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{н}} \neq 0$ .

Рассчитаем значения  $L_{ij}$  при  $\omega_{\text{н}} = 50$  Гц и изменении  $\Delta\omega_{\text{оп}}$  от минус 1 Гц до плюс 1 Гц с шагом 0,1 Гц. Графики полученных зависимостей  $L_{ij}(\Delta\omega_{\text{оп}})$  представлены на рисунках 2.3-2.8.

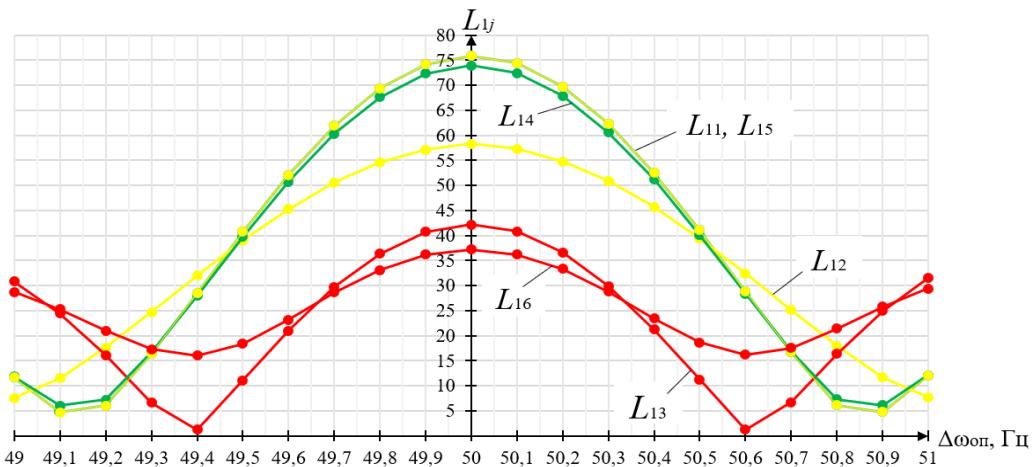


Рисунок 2.3 – Графики зависимостей  $L_{1j}(\Delta\omega_{\text{оп}})$  (при приеме сигнала «3<sub>1,6</sub>»)

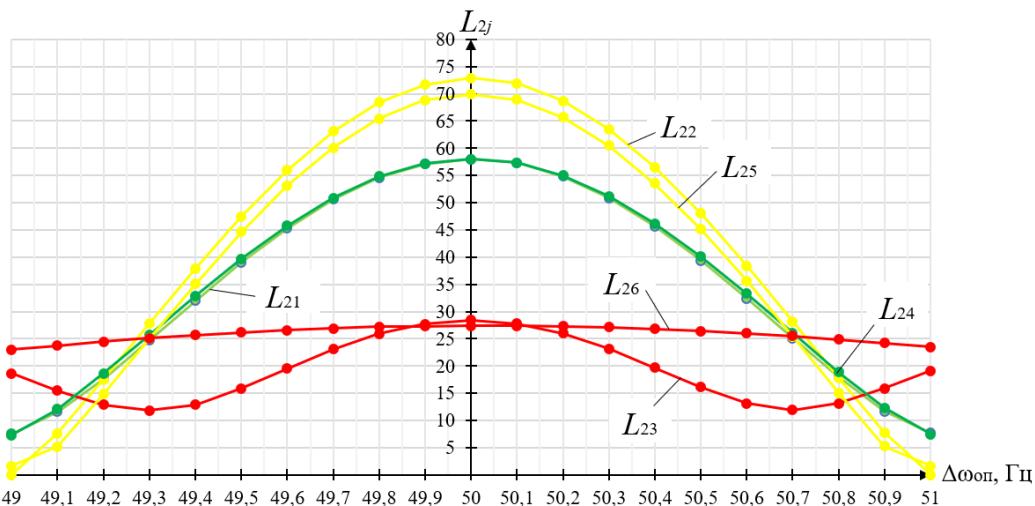


Рисунок 2.4 – Графики зависимостей  $L_{2j}(\Delta\omega_{\text{оп}})$  (при приеме сигнала «Ж<sub>1,6</sub>»)

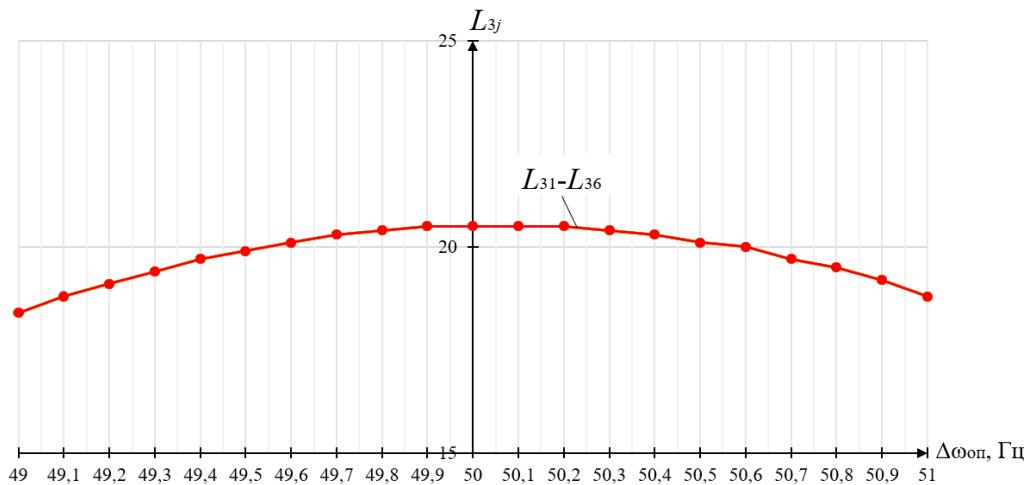


Рисунок 2.5 – Графики зависимостей  $L_{3j}(\Delta\omega_{оп})$  (при приеме сигнала «КЖ<sub>1,6</sub>»)

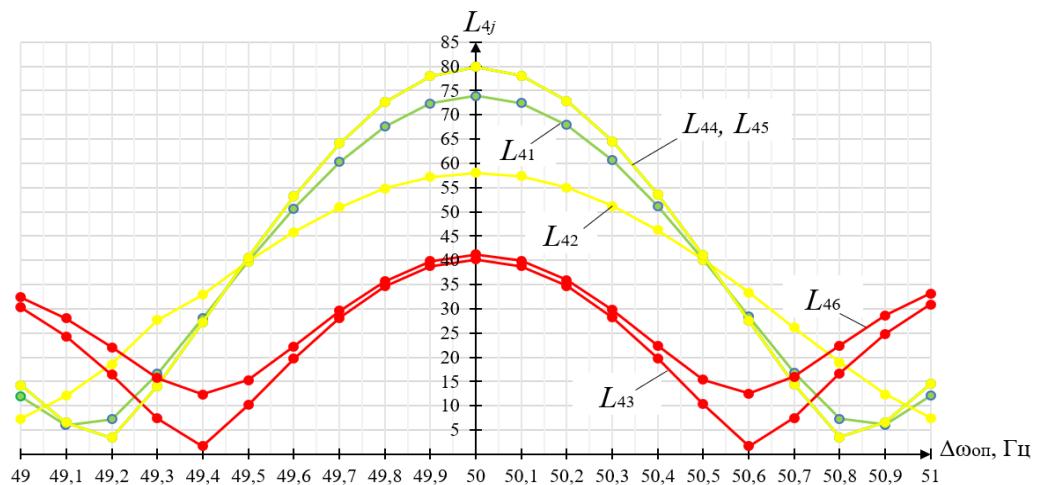


Рисунок 2.6 – Графики зависимостей  $L_{4j}(\Delta\omega_{оп})$  (при приеме сигнала «Z<sub>1,86</sub>»)

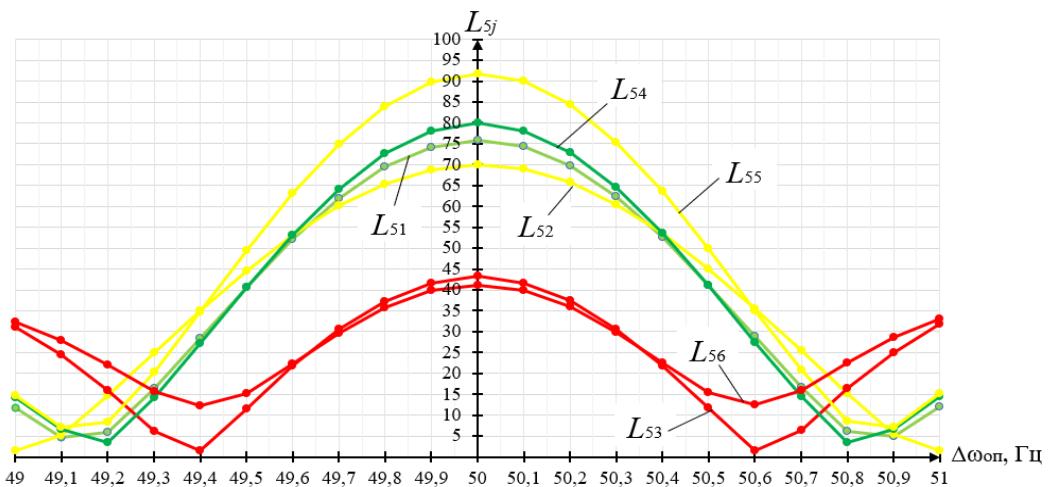


Рисунок 2.7 – Графики зависимостей  $L_{5j}(\Delta\omega_{оп})$  (при приеме сигнала «Ж<sub>1,86</sub>»)

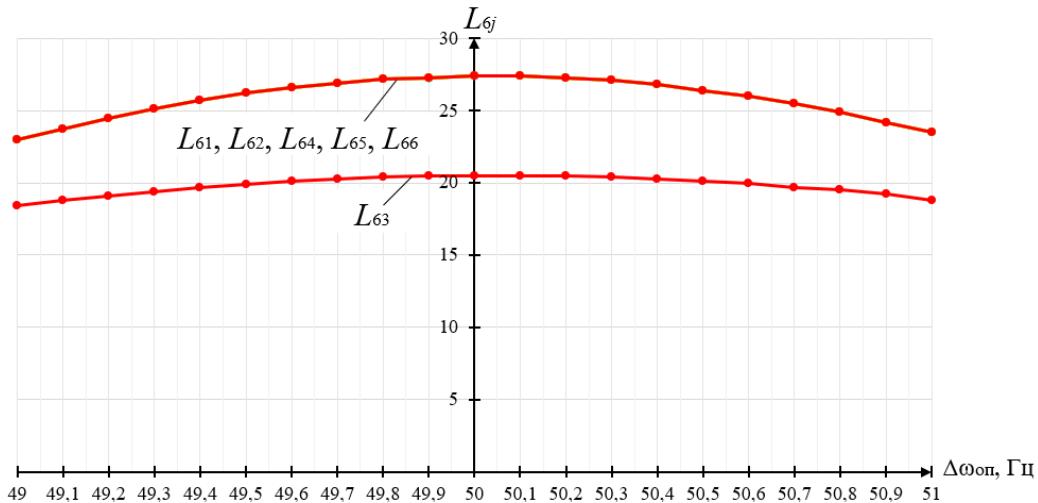


Рисунок 2.8 – Графики зависимостей  $L_{6j}(\Delta\omega_{\text{оп}})$  (при приеме сигнала «КЖ<sub>1,86</sub>»)

Графики на рисунках 2.3-2.8 показывают высокую зависимость значений  $L_{ij}$  от  $\Delta\omega_{\text{оп}}$ . Так, при величине расстройки  $\Delta\omega_{\text{оп}} = 0,4$  Гц значение  $L_{11}$  уменьшается в 1,45 раза, а при  $\Delta\omega_{\text{оп}} = 0,8$  Гц значение  $L_{11}$  уменьшается уже в 12,44 раза. Причиной уменьшения  $L_{ij}$  в соответствии с (2.4) является уменьшение  $X_{ij}$ , которое в свою очередь является результатом уменьшения  $X_{ij\ s}$  и  $X_{ij\ c}$  в соответствии с (2.3). Это, в соответствии с (2.1) и (2.2) объясняется неравенством значений  $\omega_{\text{оп}}$  и  $\omega_n$ . Таким образом неравенство значений  $\omega_{\text{оп}}$  и  $\omega_n$  вызывает уменьшение амплитуды на выходе детектора огибающей. Из графиков также следует, что при величине расстройки  $\Delta\omega_{\text{оп}}$  более 0,7 Гц становится невозможным достоверный прием любого сигнала АЛСН.

Таким образом, по совокупности трех рассмотренных случаев можно сделать вывод, что рассматриваемый корреляционный приемник сигналов АЛСН, осуществляющий «прием в целом», не способен обеспечить достоверное различение всех сигналов АЛСН даже при идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации и отсутствии помех, а при рассогласовании частот опорных и несущего колебаний более чем на 0,7 Гц (при частоте несущей 50 Гц) становится невозможным достоверный прием любого сигнала АЛСН.

Однако, установленная при рассмотрении второго случая инвариантность функций правдоподобия к начальной фазе колебания несущей принимаемого сигнала позволяет предположить, что корреляционный прием может быть

использован для решения задачи амплитудного детектирования огибающей сигнала АЛСН при поэлементном приеме. В этом случае, поскольку в канале АЛСН используется амплитудная манипуляция гармонической несущей, в приемнике решается задача не различения сигналов, а обнаружения сигнала на фоне помехи.

Это позволяет упростить приемник, представленный на рисунке 2.1, отказавшись от амплитудной манипуляции опорных колебаний (приняв  $f_i(t) = 1$ ). При этом исключается за ненадобностью система цикловой синхронизации, что снижает сложность приемника. Приемник, решающий задачу обнаружения сигнала АЛСН, будет представлять собой приемник с квадратурным амплитудным детектированием и пороговым решающим устройством; функциональная схема такого приемника представлена на рисунке 2.9.

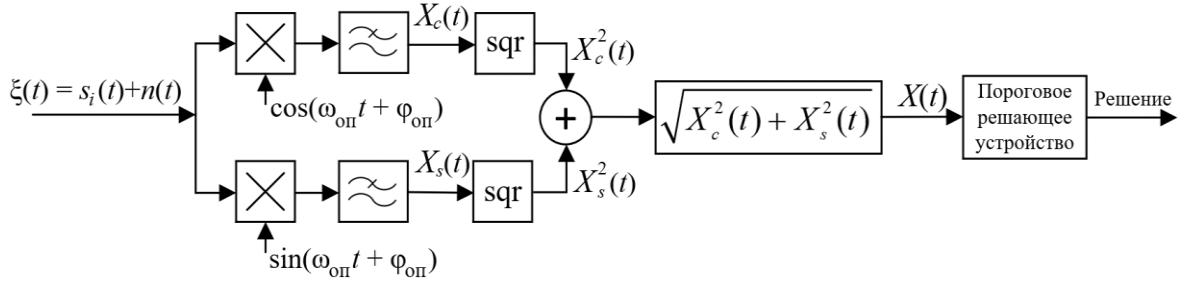


Рисунок 2.9 – Функциональная схема приемника с квадратурным амплитудным детектированием и пороговым решающим устройством

В схеме, представленной на рисунке 2.9, в квадратурном амплитудном детекторе огибающей принимаемого колебания  $\xi(t)$  организуются два квадратурных канала с опорными синусоидальным и косинусоидальным колебаниями с частотой  $\omega_{\text{оп}}$  и начальной фазой  $\phi_{\text{оп}}$ . По сути, в данном приемнике осуществляется синхронное амплитудное детектирование комплексной огибающей принимаемого сигнала АЛСН с тем отличием от известного синхронного приемника [83], что для обеспечения инвариантности результата детектирования к начальной фазе несущего колебания используются два квадратурных канала.

Формируемые на выходе квадратурного амплитудного детектора отсчеты модуля  $X(t)$  комплексной огибающей поступают на вход порогового решающего устройства, принимающего решение о наличии или отсутствии сигнала АЛСН.

В данном приемнике вследствие его инвариантности к начальной фазе принимаемого несущего колебания не требуется синхронизация опорных и несущего колебания с точностью до фазы. Это позволяет также отказаться и от системы фазовой автоподстройки частоты опорных колебаний, что дополнительно снижает сложность приемника. Однако, как было установлено при исследовании оптимального корреляционного приемника для различения сигналов АЛСН, несовпадение частот несущего и опорных колебаний в предлагаемом приемнике будет приводить к снижению амплитуды огибающей на выходе квадратурного амплитудного детектора, что может негативно сказаться на устойчивости функционирования квадратурного приемника. Такая особенность квадратурного амплитудного детектирования отмечается также в [84].

Другой особенностью квадратурного амплитудного детектирования является уменьшение амплитуды сигнала на выходе детектора в два раза в сравнении с амплитудой сигнала на входе детектора. Это приводит к снижению чувствительности приемника с квадратурным амплитудным детектированием в два раза. Нивелировать данную особенность можно, восстановив амплитуду огибающей путем увеличения модуля комплексной огибающей в два раза. Предлагаемый способ поэлементного приема сигналов АЛСН, отличающийся применением квадратурного амплитудного детектирования огибающей с восстановлением ее амплитуды (условно – КАДВ), реализуется функциональной схемой приемника, представленной на рисунке 2.10.

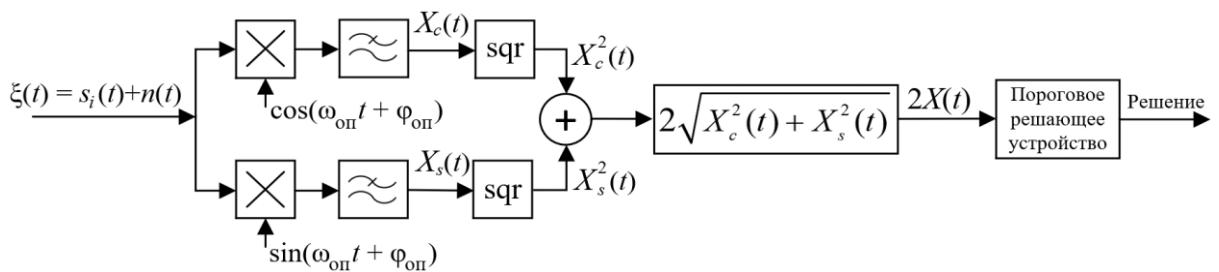


Рисунок 2.10 – Функциональная схема приемника с квадратурным амплитудным детектированием, восстановлением амплитуды огибающей и пороговым решающим устройством

## 2.2 Методы нелинейной обработки сигналов в канале АЛСН

Исследования показывают [85-89], что для повышения помехоустойчивости дискретных систем передачи сообщений в условиях воздействия негауссовых импульсных и гармонических помех (ГП) целесообразно использовать нелинейную обработку в одном или нескольких сечениях приемника.

При этом схема квазиоптимального приемника дискретных сигналов при воздействии негауссовых помех состоит из приемника, оптимального (или реального) по отношению к гауссовским помехам и стоящего перед ним оптимального (или робастного) блока нелинейного (в общем случае инерционного) преобразования (БНП).

### 2.2.1 Оценка эффективности нелинейных подавителей импульсной помехи

При воздействии импульсной помехи на полосовой фильтр реакция фильтра описывается процессом типа ударного возбуждения контура. Для описания такого процесса используется обобщенное гауссово распределение в виде [87]:

$$W_{\pi}(n, \nu) = \frac{\nu}{2\sqrt{2\Gamma(1/\nu)}\sigma} \exp\left[-\frac{|n|^{\nu}}{2^{\nu/2}\sigma^{\nu}}\right],$$

где  $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} z^{x-1} e^{-z} dz$  – гамма-функция;

$\nu$  – параметр, принимающий для различных классов помехи значения от 0,5 до 10 и более.

При  $\nu = 2$  распределение переходит в гауссово, при  $\nu = 1$  – в лапласовское.

В случае экспоненциального (лапласовского) распределения ( $\nu = 1$ ) характеристика оптимального БНП имеет вид:

$$z(n) = \sqrt{2/\sigma_{\pi}^2} \operatorname{sign}(n).$$

В этом случае БНП должен представлять собой идеальный амплитудный ограничитель (АО), входящий в состав известной схемы ШОУ (широкая полоса-

ограничитель-узкая полоса). Следовательно, БНП в виде АО при лапласовской помехе является наилучшим среди всех других [89].

Для описания действующей на входе приемника аддитивной смеси флюктуационного шума и импульсных помех используется распределение вида

$$W_{\text{п}}(n) = (1 - P_{\text{ип}})W(n_{\phi\text{п}}) + P_{\text{ип}}W(n_{\text{ип}}), \quad (2.5)$$

где  $W(n_{\phi\text{п}})$  – гауссова плотность распределения флюктуационной составляющей помехи;

$W(n_{\text{ип}})$  – плотность распределения импульсной составляющей помехи, обычно с дисперсией, значительно превышающей дисперсию флюктуационной составляющей;

$P_{\text{ип}}$  – весовой коэффициент,  $P_{\text{ип}} \leq 1$ .

Под  $P_{\text{ип}}$ , например, может пониматься среднее относительное время продолжительности импульсов помехи (или вероятность появления импульсов помехи).

Для подавления помехи, описываемой распределением (2.5), может использоваться БНП в виде бланкирующего устройства (БУ), полностью отключающего приемный тракт во время действия импульсной помехи.

Эффективность БНП в виде АО или БУ существенно зависит от выбора значения порога амплитудного ограничения или бланкирования. При отсутствии сигнала ее можно охарактеризовать коэффициентами  $\mu_{\text{AO}}$  и  $\mu_{\text{Б}}$ , численно равными соответственно отношению энергии  $E_{\text{ип}}$  импульса помехи до нелинейного преобразования к энергии  $E_{\text{AO}}$  этого же импульса после его амплитудного ограничения и к энергии  $E_{\text{Б}}$  после бланкирования:

$$\mu_{\text{AO}} = \frac{E_{\text{ип}}}{E_{\text{AO}}}; \quad \mu_{\text{Б}} = \frac{E_{\text{ип}}}{E_{\text{Б}}}. \quad (2.6)$$

Импульсы наводимой в ЛПК помехи от тягового тока имеют форму, близкую к треугольной [27]. Рассмотрим импульс помехи треугольной формы, представленный на рисунке 2.11, а.

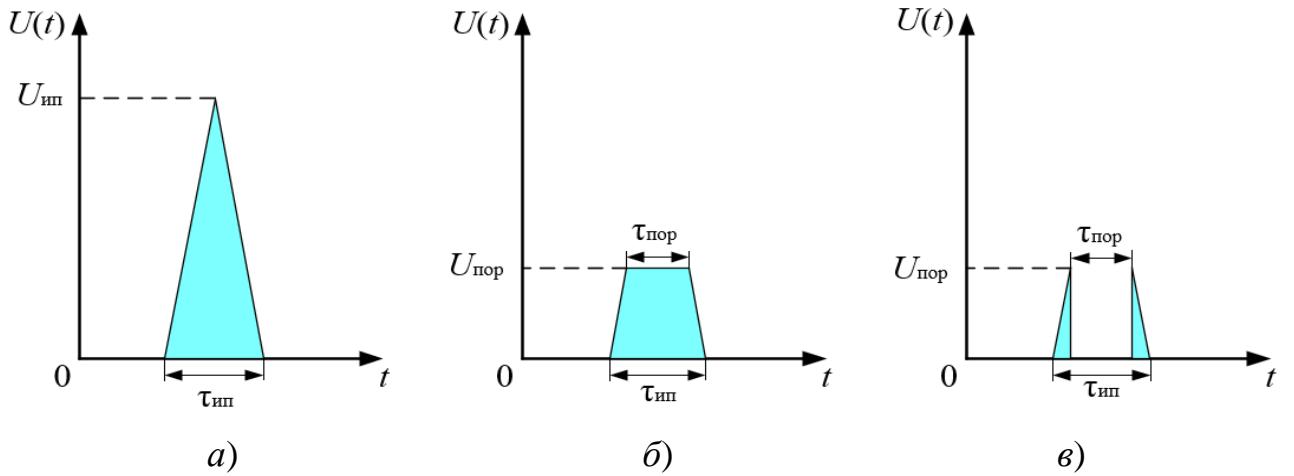


Рисунок 2.11 – Графики импульса помехи на входе БНП (а), на выходе АО (б) и на выходе БУ (в)

Энергия импульса электрического тока (напряжения), как известно, численно равна его площади [90]. Энергия импульса напряжения треугольной формы определяется выражением

$$E_{\text{ип}} = \frac{1}{2} U_{\text{ип}} \tau_{\text{ип}}, \text{ В}\cdot\text{с}, \quad (2.7)$$

где  $U_{\text{ип}}$  – амплитуда импульса помехи, В;

$\tau_{\text{ип}}$  – длительность импульса помехи, с, определенная по его основанию.

В результате амплитудного ограничения энергия оставшейся части импульса помехи, имеющей форму трапеции (рисунок 2.11, б), будет равна

$$E_{\text{АО}} = \frac{1}{2} U_{\text{пор}} (\tau_{\text{ип}} + \tau_{\text{пор}}), \quad (2.8)$$

где  $U_{\text{пор}}$  – пороговое напряжение амплитудного ограничения или бланкирования;

$\tau_{\text{пор}}$  – длительность импульса помехи на уровне порога амплитудного ограничения или бланкирования.

Величина  $\tau_{\text{пор}}$  определяется выражением

$$\tau_{\text{пор}} = \tau_{\text{ип}} \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{пор}}}{U_{\text{ип}}} = \tau_{\text{ип}} \left( 1 - \frac{U_{\text{пор}}}{U_{\text{ип}}} \right). \quad (2.9)$$

Подставив (2.9) в (2.8) и упростив, получаем выражение для энергии импульса помехи после амплитудного ограничения:

$$E_{AO} = U_{\text{пор}} \cdot \tau_{\text{ип}} \left( 1 - \frac{U_{\text{пор}}}{2U_{\text{ип}}} \right). \quad (2.10)$$

Определим аналогичным образом выражение для энергии импульса помехи после бланкирования. В результате бланкирования импульса его площадь в сравнении с площадью ограниченного по амплитуде импульса уменьшается на площадь прямоугольника со сторонами  $U_{\text{пор}}$  и  $\tau_{\text{пор}}$ :

$$E_B = U_{\text{пор}} \cdot \tau_{\text{ип}} \left( 1 - \frac{U_{\text{пор}}}{2U_{\text{ип}}} \right) - U_{\text{пор}} \cdot \tau_{\text{пор}}. \quad (2.11)$$

Подставив в (2.11) выражение из (2.9) и выполнив преобразования, получим:

$$E_B = \tau_{\text{ип}} \frac{U_{\text{пор}}^2}{2U_{\text{ип}}}. \quad (2.12)$$

С учетом (2.7), (2.10) и (2.12) выражения (2.6) принимают соответственно вид

$$\mu_{AO}(\rho_{\text{пор}}) = \frac{1}{2\rho_{\text{пор}} \left( 1 - \frac{\rho_{\text{пор}}}{2} \right)}, \quad (2.13)$$

$$\mu_B(\rho_{\text{пор}}) = \frac{1}{\rho_{\text{пор}}^2}, \quad (2.14)$$

где  $\rho_{\text{пор}} = \frac{U_{\text{пор}}}{U_{\text{ип}}}$  – относительный порог амплитудного ограничения или бланкирования.

Графики зависимостей (2.13) и (2.14) представлены на рисунке 2.12.

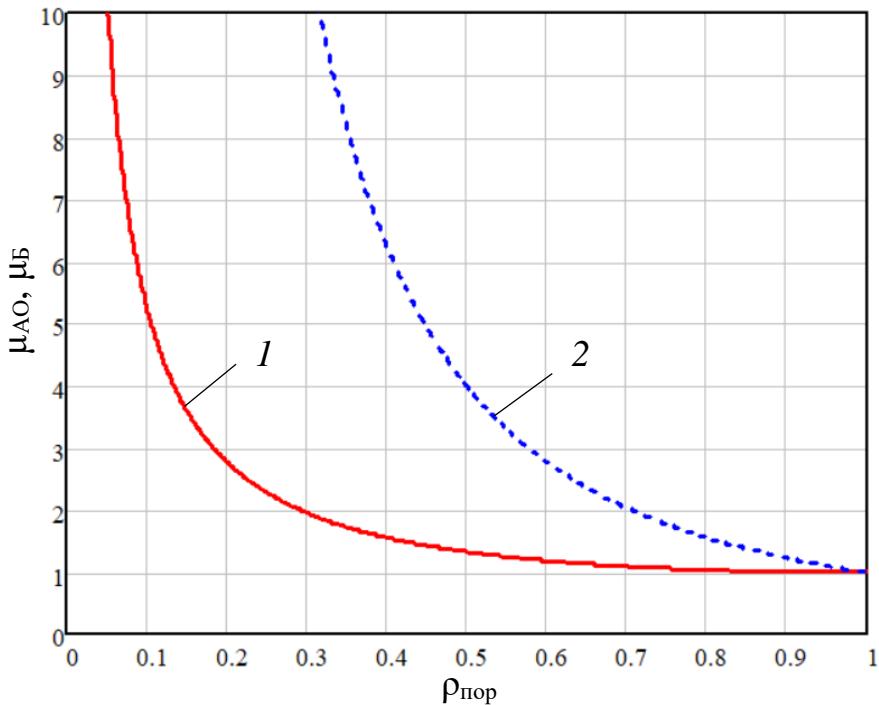


Рисунок 2.12 – Графики зависимостей коэффициентов  $\mu_{\text{AO}}$  (1) и  $\mu_{\text{B}}$  (2) от относительного порога амплитудного ограничения или бланкирования  $\rho_{\text{пор}}$  при импульсной помехе треугольной формы

Из графиков рисунка 2.12 видно, что эффективность амплитудного ограничения и бланкирования импульса помехи треугольной формы нелинейно растет с понижением  $\rho_{\text{пор}}$ , при этом эффективность бланкирования становится значительно выше эффективности амплитудного ограничения. Так, при  $\rho_{\text{пор}} = 0,6$  имеем  $\mu_{\text{AO}} = 1,19$  и  $\mu_{\text{B}} = 2,78$  ( $\mu_{\text{B}}/\mu_{\text{AO}} = 2,336$ ), а при  $\rho_{\text{пор}} = 0,4$  имеем  $\mu_{\text{AO}} = 1,56$  и  $\mu_{\text{B}} = 6,25$  ( $\mu_{\text{B}}/\mu_{\text{AO}} = 4,006$ ). Таким образом, при отсутствии сигнала для подавления ИП целесообразным является применение бланкирования с минимально возможным порогом бланкирования.

### 2.2.2 Способ подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования

Существенным недостатком бланкирования является то, что при наличии сигнала бланкирование ИП приводит к полному подавлению на интервале бланкирования не только помехи, но и сигнала, что в приемнике сигнала АЛСН

приведет к снижению амплитуды огибающей на выходе амплитудного детектора и повысит вероятность возникновения ошибки в приеме сигнала. Данный эффект от бланкирования сильнее, чем от амплитудного ограничения сигнала, при котором подавление сигнала на интервале амплитудного ограничения неполное. В наихудшем случае бланкирование сигнала может привести к практически полному подавлению его в устройстве бланкирования и потере работоспособности приемника.

С учетом данного обстоятельства предлагается следующий способ подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования: в импульсах амплитудно-манипулированного сигнала АЛСН для уменьшения негативного эффекта его подавления использовать амплитудное ограничение, а в интервалах сигнала АЛСН, в которых колебание несущей отсутствует, для более эффективного подавления импульсной помехи использовать бланкирование. Необходимость выбора БНП (АО или БУ) в подавителе импульсных помех (ПИП) в зависимости от того, какой элемент принимаемого сигнала АЛСН (импульс или интервал) присутствует в данный момент на входе БНП, приводит к тому, что алгоритм функционирования ПИП должен иметь разветвленную структуру, а проверяемым условием будет являться наличие на входе БНП импульса сигнала АЛСН.

Структурная схема фрагмента ПИП, реализующая предложенный способ нелинейного подавления ИП, представлена на рисунке 2.13. При истинности проверяемого условия посредством управляемого коммутатора (УК) осуществляется выбор АО, при ложности – выбор БУ.

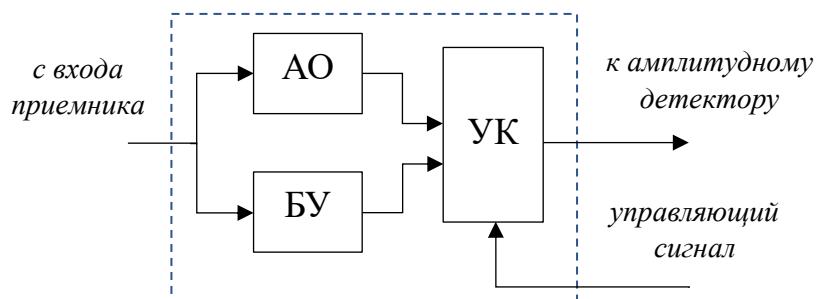


Рисунок 2.13 – Структурная схема фрагмента ПИП, реализующая предложенный способ нелинейного подавления импульсных помех

Проверка данного условия затрудняется тем, что моменты поступления на вход ПИП импульсов и интервалов сигнала АЛСН заранее неизвестны. Данное затруднение можно обойти, если учесть, что сигнал АЛСН подавляющую часть времени представляет собой многократное циклическое повторение одной и той же кодовой комбинации с одними и теми же временными параметрами (при движении локомотива по участку пути в границах одной рельсовой цепи, по рельсовой линии которой передается этот сигнал). Отсюда следует, что проверяемое условие можно формировать на основе принятого ранее сигнала по предыдущей кодовой комбинации. Для этого предлагается использовать логический (управляющий) сигнал с выхода приемника, задержав его во времени, так чтобы начало первого логического импульса кодовой комбинации на выходе приемника совпало по времени с началом первого импульса сигнала следующей кодовой комбинации, поступающей на вход ПИП. Недостатком данного решения является несоответствие логических импульсов и интервалов, поступающих с выхода приемника, импульсам и пазам сигнала АЛСН на входе ПИП при переходе локомотива на участок пути со следующей кодируемой рельсовой цепью. Однако данный недостаток можно считать несущественным, поскольку это несоответствие будет автоматически устранено после приема первой полной кодовой комбинации из новой РЦ.

### **2.2.3 Методика определения порога амплитудного ограничения или бланкирования импульсной помехи**

Эффективность амплитудного ограничения и бланкирования импульса помехи, как было показано выше, существенно зависит от значения порога амплитудного ограничения или бланкирования  $U_{\text{пор}}$ . Для обеспечения максимальной эффективности ПИП  $U_{\text{пор}}$  должно иметь минимально возможное значение, при котором еще не происходит искажения сигнала АЛСН в АО или БУ при отсутствии ИП, т. е. не менее амплитуды  $U_c$  сигнала АЛСН на входе ПИП:

$$U_{\text{пор}} \geq U_c. \quad (2.15)$$

Для определения порога амплитудного ограничения или бланкирования предлагается следующая методика, позволяющая обеспечить высокую эффективность нелинейного подавления ИП в приемнике сигналов АЛСН.

В процессе движения локомотива от передающего к приемному концу РЛ амплитуда сигнала АЛСН, как было показано в п. 1.3, увеличивается, следовательно, величина  $U_{\text{пор}}$  также должна увеличиваться, т.е. быть динамической. С учетом наличия временного интервала длительностью  $\Delta t$  между соседними импульсами сигнала АЛСН амплитуда  $U_{\text{c2}}$  последующего импульса сигнала (в момент времени  $t_2$ ) увеличится на величину  $\Delta U_{\text{c}}$  в сравнении с амплитудой  $U_{\text{c1}}$  предыдущего импульса (в момент времени  $t_1$ ) (рисунок 2.14). Определение амплитуды сигнала может осуществляться только в его импульсах и не ранее, чем после узкополосной фильтрации, которая дает временную задержку в получении результата. Поэтому в момент времени  $t_2$  (начало следующего импульса сигнала АЛСН) величина  $U_{\text{пор}}$  будет иметь значение, определенное к моменту времени  $t_1$  по амплитуде  $U_{\text{c1}}$  предыдущего импульса сигнала АЛСН. Если принять  $U_{\text{пор}} = U_{\text{c1}}$ , то в момент времени  $t_2$  будет иметь место  $U_{\text{пор}} < U_{\text{c2}}$ , в результате чего не выполняется условие (2.15) и в ПИП будет происходить нелинейное искажение сигнала АЛСН. Для исключения данной ситуации значение  $U_{\text{пор}}$  следует определять не только по амплитуде  $U_{\text{c1}}$  принятого ранее импульса сигнала, но и с учетом амплитуды  $U_{\text{c2}}$  сигнала в следующем импульсе (ее приращения на величину  $\Delta U_{\text{c}}$ ). Таким образом, в ПИП расчетное значение  $U_{\text{пор}}$  должно быть не менее значения амплитуды следующего импульса сигнала АЛСН, т. е.  $U_{\text{пор}} \geq U_{\text{c2}}$ .

Тогда текущее значение  $U_{\text{пор}}$  можно определить выражением

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{c2}} = U_{\text{c1}} + \Delta U_{\text{c}} = U_{\text{c1}} \left( 1 + \frac{\Delta U_{\text{c}}}{U_{\text{c1}}} \right) = K_{\text{з.пор}} U_{\text{c1}}, \quad (2.16)$$

Где  $K_{\text{з.пор}} = 1 + \Delta U_{\text{c}} / U_{\text{c1}}$  – коэффициент запаса по порогу амплитудного ограничения или бланкирования, значение которого определяется максимально возможной величиной  $\Delta U_{\text{c}}$  (т. е. при наихудших условиях).

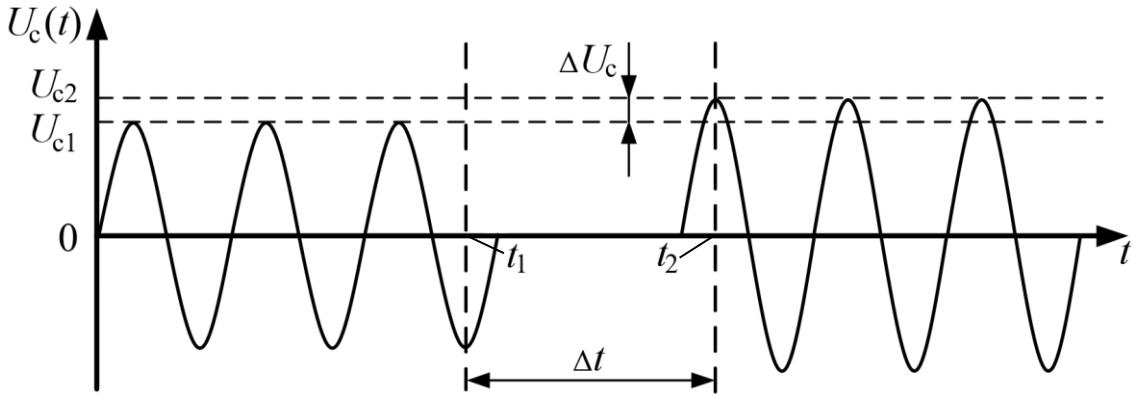


Рисунок 2.14 – Определение порога амплитудного ограничения или бланкирования  $U_{\text{пор}}$

Из (2.16) имеем

$$K_{\text{з.пор}} = \frac{U_{\text{пор}}}{U_{\text{c1}}} = \frac{U_{\text{c2}}}{U_{\text{c1}}}. \quad (2.17)$$

Напряжение  $U_c$  на входе локомотивного приемника пропорционально ЭДС  $\dot{E}_{\text{пк}}$ , наводимой в локомотивных приемных катушках сигнальным током АЛСН в рельсах под катушками [10]. В свою очередь, наводимая в катушках ЭДС пропорциональна величине сигнального тока АЛСН в рельсах [91]. Следовательно,

$$K_{\text{з.пор}} = \left| \frac{\dot{E}_{\text{пк2}}}{\dot{E}_{\text{пк1}}} \right| = \left| \frac{K_{\text{тн2}} \cdot \dot{I}_{\text{л2}}}{K_{\text{тн1}} \cdot \dot{I}_{\text{л1}}} \right|, \quad (2.18)$$

где  $K_{\text{тн1}}$  и  $K_{\text{тн2}}$  – коэффициенты преобразования тока сигнала АЛСН, распространяющегося в РЛ, в ЭДС  $\dot{E}_{\text{пк1}}$  и  $\dot{E}_{\text{пк2}}$  на выходе ЛПК в начале и в конце интервала времени  $\Delta t$  (см. рисунок 2.14) соответственно;

$\dot{I}_{\text{л1}}$  и  $\dot{I}_{\text{л2}}$  – средняя величина тока АЛСН в рельсовых нитях под ЛПК в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Согласно [91],  $\dot{E}_{\text{пк}}$  связана с  $\dot{I}_{\text{л}}$  соотношением

$$\dot{E}_{\text{пк}} = -\frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot \dot{I}_{\text{л}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot R} \cdot \omega \cdot S, \quad (2.19)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды (стали сердечника ЛПК), Гн/м;

$\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;

$R$  – расстояние от излучающего проводника до точки в пространстве, м;

$\omega$  – угловая частота тока АЛСН, рад/с;

$S$  – площадь поперечного сечения сердечника ЛПК, м<sup>2</sup>.

Для одного и того же локомотива электрические, магнитные и геометрические параметры ЛПК, а также частота тока АЛСН в пределах одной РЛ являются постоянными величинами. Величина  $R$  определяется высотой подвеса ЛПК на локомотиве и их расположением относительно оси рельсов. Результаты исследования, представленные в [92], позволяют сделать вывод, что без учета боковой качки и галопирования кузова локомотива величину  $R$  для результирующей ЭДС с выхода согласно включенных ЛПК можно считать постоянной, в том числе при движении локомотива в кривых участках пути.

С учетом изложенного в выражении (2.19) без существенных неточностей можно считать  $K_{\text{тн1}} = K_{\text{тн2}}$  и тогда (2.18) примет вид:

$$K_{\text{з.пор}} = \left| \frac{\dot{I}_{\text{л2}}}{\dot{I}_{\text{л1}}} \right|. \quad (2.20)$$

Ранее было получено выражение (1.25), позволяющее определить зависимость  $\dot{I}_{\text{л}}(x)$  тока в рельсах под ЛПК от ординаты  $x$  места подключения локомотивного приемника (поездного шунта). Соответственно, выражение (2.20) можно записать в виде

$$K_{\text{з.пор}}(x_1) = \left| \frac{\dot{I}_{\text{л}}(x_2)}{\dot{I}_{\text{л}}(x_1)} \right|, \quad (2.21)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – значения ординаты  $x$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

С учетом (1.25) выражение (2.21) примет вид

$$K_{\text{з.пор}}(x_1) = \left| \frac{D_{\text{л}}(x_1) \cdot Z'_{\text{вхн}} + B_{\text{л}}(x_1)}{D_{\text{л}}(x_2) \cdot Z'_{\text{вхн}} + B_{\text{л}}(x_2)} \right|. \quad (2.22)$$

Согласно (1.24) с учетом того, что ордината  $x_2$  больше ординаты  $x_1$  на длину пути, проходимого поездом за интервал времени  $\Delta t$  при максимально допустимой

скорости  $v_d$  его движения, при которой возможно использование системы АЛСН, для коэффициентов  $B_{\text{л}}(x_1)$ ,  $B_{\text{л}}(x_2)$ ,  $D_{\text{л}}(x_1)$  и  $D_{\text{л}}(x_2)$  имеем

$$\left. \begin{array}{l} l_1(x_1) = l - x_1; \\ l_2(x_1) = x_1; \\ l_1(x_2) = l - x_1 - v_d \Delta t; \\ l_2(x_2) = x_1 + v_d \Delta t. \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

Выражение (2.22) совместно с (1.24) и (2.23) позволяет получить зависимость  $K_{3,\text{пор}}$  от ординаты  $x_1$  при заданных значениях длины РЛ и первичных параметров, длительности интервала  $\Delta t$  и допустимой скорости поезда  $v_d$ .

Выполним расчет согласно предлагаемой методике, построим и проанализируем график зависимости (2.22) для наихудших условий, когда требуется наибольший запас по величине  $U_{\text{пор}}$ .

Под наихудшими условиями при определении  $U_{\text{пор}}$  по выражению (2.16) понимаются такие, при которых величина  $\Delta U_c$  за время  $\Delta t$  будет иметь максимальное значение. Очевидно, что это будет иметь место при максимальной длительности  $\Delta t$  интервала между максимумами несущей в соседних импульсах сигнала АЛСН.

Интервал между соседними импульсами сигнала АЛСН имеет наибольшую длительность 0,79 с в сигналах КК «З» и «Ж» с длительностью кодового цикла 1,86 с (см. рис.1.6). К этому значению следует прибавить длительность одного периода колебания несущей сигнала (по полпериода в конце предыдущего импульса и в начале следующего импульса сигнала), поскольку в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  фаза колебания несущей может иметь любое случайное значение. Тогда

$$\Delta t_{\text{max}} = 0,79 \text{ с} + 0,04 \text{ с} = 0,83 \text{ с},$$

где 0,04 с – максимальная длительность одного периода колебания несущей сигнала АЛСН (при частоте несущей 25 Гц).

Согласно [76], «расстановка светофоров четырехзначной автоблокировки... по требованию владельца инфраструктуры, может быть выполнена для:

- пригородных и пассажирских – до 140 км/ч включительно;
- грузовых – до 90 км/ч включительно.

При скоростях движения пассажирских поездов более 140 км/ч и грузовых более 90 км/ч для обеспечения расчетных тормозных путей и величин межпоездных интервалов предусматривают многозначную локомотивную сигнализацию». Таким образом, максимальна допустимая скорость, при которой возможно использование системы АЛСН – 140 км/ч, откуда  $v_d = 38,9$  м/с.

На рисунке 2.15 представлены графики зависимости (2.22), полученной при  $\Delta t_{\max} = 0,83$  с,  $v_d = 38,9$  м/с, значениях сопротивления изоляции 0,5; 1; 50 Ом·км и РЛ длиной 1 и 2,6 км.

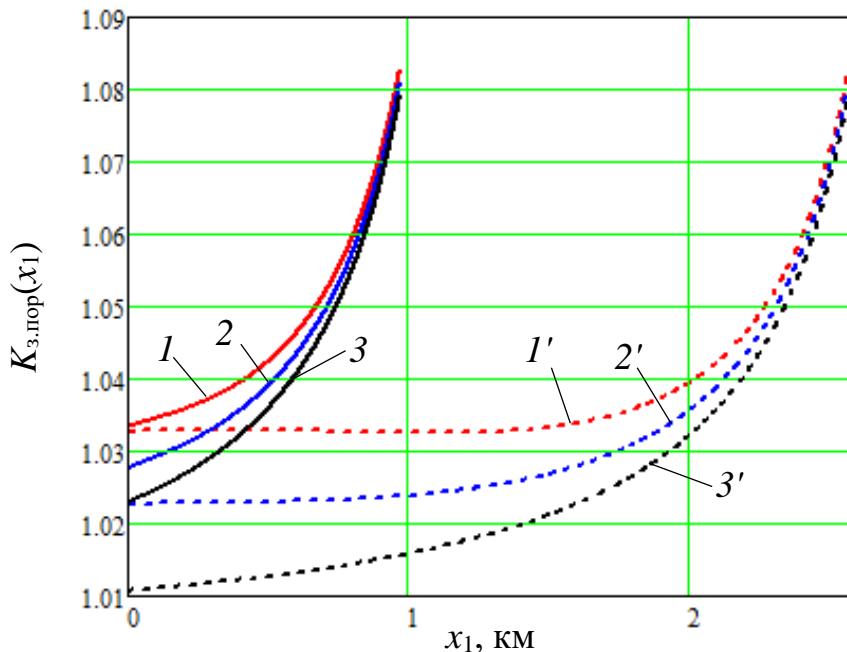


Рисунок 2.15 – Графики зависимости  $K_{3,\text{пор}}(x_1)$ :

- 1, 1' – при  $r_{\text{из}1} = 0,5$  Ом·км и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно;
- 2, 2' – при  $r_{\text{из}2} = 1$  Ом·км и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно;
- 3, 3' – при  $r_{\text{из}3} = 50$  Ом·км и длине РЛ 1 и 2,6 км соответственно

Представленные на рисунке 2.15 графики показывают, что в процессе движения поезда вдоль рельсовой линии величина  $K_{3,\text{пор}}$  изменяется от своего минимального значения (при  $x_1 = 0$  в конце РЛ) до максимального (при  $x_1 = l - v_d \Delta t_{\max}$  в начале РЛ). Величина  $K_{3,\text{пор}}$  зависит не только от ординаты  $x_1$ , но и от

сопротивления изоляции РЛ, причем эта зависимость максимальна в конце РЛ и минимальна (практически отсутствует) в начале РЛ.

Для обеспечения максимальной эффективности нелинейного подавления импульсной помехи в ПИП в процессе движения поезда значение  $K_{3.\text{пор}}$  необходимо рассчитывать в каждый момент времени. Согласно (2.22) для расчета  $K_{3.\text{пор}}$  необходимо знать значения  $x_1$ , коэффициентов  $B_{\text{л}}$  и  $D_{\text{л}}$  четырехполюсника РЛ, обратного входного сопротивления  $Z'_{\text{вхн}}$  устройств согласования в начале РЛ при замкнутых накоротко зажимах источника сигнала. Значение  $x_1$  можно определить, например, имеющимися в КЛУБ-У и БЛОК штатными средствами позиционирования поезда (посредством спутниковой навигации, датчиков пути и скорости). Величины  $B_{\text{л}}$  и  $D_{\text{л}}$  в соответствии с (1.24) зависят от сопротивления  $Z_{\text{ш}}$  поездного шунта, входного сопротивления  $Z_{\text{вхк}}$  аппаратуры в конце РЛ и вторичных параметров РЛ (волнового сопротивления  $Z_{\text{в}}$  и коэффициента распространения волны  $\gamma$ ). Вторичные параметры РЛ в свою очередь определяются ее первичными параметрами (сопротивлением изоляции  $r_{\text{и}}$  и сопротивлением рельсовой петли  $Z_{\text{р}}$ ). Величина  $Z_{\text{вхк}}$  зависит от  $Z_{\text{р}}$  и коэффициентов четырехполюсника конца РЦ [77]. В свою очередь величина  $Z'_{\text{вхн}}$  зависит от коэффициентов  $A_{\text{н}}$  и  $B_{\text{н}}$  четырехполюсника начала РЦ. Указанные величины являются случайными, их значения зависят от параметров элементов конкретной РЦ, конструкции и состояния ВСП и параметров конкретного поезда. На практике определение их значений с достаточной точностью является затруднительным. Обойти это затруднение можно, не рассчитывая  $K_{3.\text{пор}}$  в процессе движения поезда, а приняв одно его значение, при котором не будет происходить искажение сигнала АЛСН в рассмотренных выше наихудших расчётных условиях (длина РЛ максимальна и равна 2,6 км, сопротивление изоляции минимально и равно 0,5 Ом·км). В этом случае значение  $K_{3.\text{пор}}$  максимально и равно 1,083.

При таком значении  $K_{3.\text{пор}}$  эффективность нелинейного подавления импульсной помехи в ПИП несколько снижается, однако в абсолютном выражении завышение значения  $K_{3.\text{пор}}$  не превышает 0,08, что составляет менее 8% в относительном выражении. Так, в соответствии с зависимостями, представленными на графиках рисунка 2.12, при завышении в наихудшем случае

$K_{3,\text{пор}}$  на 8% и, например, соответствующем увеличении  $\rho_{\text{пор}}$  с 0,4 до 0,432 значение  $\mu_{\text{AO}}$  снизится с 1,562 до 1,476 (в 1,058 раз), а  $\mu_{\text{Б}}$ , соответственно уменьшится, с 6,250 до 5,358 (в 1,166 раз). При увеличении  $\rho_{\text{пор}}$  с 0,6 до 0,648 значение  $\mu_{\text{AO}}$  снизится с 1,190 до 1,141 (в 1,043 раз), а  $\mu_{\text{Б}}$ , соответственно уменьшится, с 2,778 до 2,381 (в 1,167 раз). Таким образом, необходимость исключения искажения сигнала АЛСН в ПИП приводит к снижению эффективности нелинейного подавления ИП.

Предлагаемая методика определения порога амплитудного ограничения или бланкирования ИП, учитывающая временные параметры сигнала АЛСН и условия его распространения по рельсовой линии, позволит обеспечить эффективное нелинейное подавление импульсной помехи в ПИП без искажения сигнала АЛСН.

#### **2.2.4 Анализ эффективности нелинейного подавления гармонических помех от высоковольтных ЛЭП**

В [27] рассмотрены адаптивные и адаптивно-робастные методы подавления помех, основанные на параметрической и непараметрической идентификации плотности распределения вероятности помех, в результате чего предложены несколько структурных схем адаптивно-робастного подавителя негауссовых помех.

В частности, в качестве робастного подавителя ГП предложено использовать нелинейность с зоной нечувствительности (ЗН). Характеристика преобразования нелинейности с ЗН представлена на рисунке 2.16, математически она может быть представлена кусочно-линейной функцией  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ :

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} k(U_{\text{вх}} + d/2), & \text{при } U_{\text{вх}} < -d/2; \\ 0, & \text{при } -d/2 \leq U_{\text{вх}} \leq d/2; \\ k(U_{\text{вх}} - d/2), & \text{при } U_{\text{вх}} > d/2, \end{cases}$$

где  $k = \text{tg}\alpha$ , причем ширина ЗН для этой характеристики составляет  $d$ .

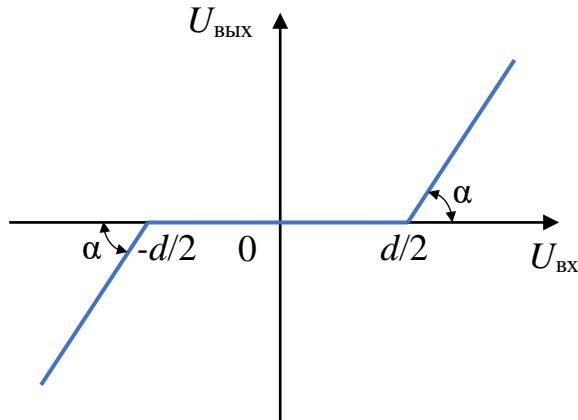


Рисунок 2.16 – Характеристика преобразования нелинейности с зоной нечувствительности

В [27] предлагается ширину ЗН вычислять по эмпирической формуле

$$d/2 = 1,4 + 1,126(1,34 - \hat{E}_k),$$

где  $\hat{E}_k$  – оценка эксцесса распределения входной смеси сигнала и помех.

При этом предполагается, что отношение сигнал/помеха на входе блока вычисления эксцесса  $h^2 \ll 1$  и, следовательно, сигнал не оказывает существенного влияния на параметры распределения входной смеси и на вычисляемое значение эксцесса.

Такой способ подавления мощных ГП представляет интерес, но применительно к сигналу и помехам в канале АЛСН требует уточнения. В частности, предложенная в [27] формула расчета ширины ЗН выведена для случая воздействия стационарной ГП. В канале АЛСН же наиболее мощная гармоническая помеха – это помеха от высоковольтной ЛЭП, являющаяся нестационарной, т. к. существенно изменяется в пределах длительности кодового цикла сигнала АЛСН. Следовательно, необходим иной подход к расчету ширины ЗН.

Влияние ГП от высоковольтной ЛЭП проявляется в появлении дополнительной постоянной составляющей в огибающей сигнала АЛСН на выходе амплитудного детектора. Соответственно, применение БНП в виде блока с ЗН (назовем его подавителем гармонических помех (ПГП)) целесообразно после

амплитудного детектирования сигнала. Основная сложность применения ПГП заключается в расчете границы ЗН.

Рассмотрим график огибающей аддитивной смеси двоичного сигнала (чтобыющиеся импульсы и интервалы длительностью 0,12 с амплитудно-манипулированной несущей частотой 50 Гц и амплитудой 0,4 В) и гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП с горизонтальным расположением проводов на выходе амплитудного детектора (рисунок 2.17), полученный с помощью имитационных моделей помех прямого и косвенного влияния ЛЭП [93, 94]. Как видно, воздействие помехи приводит к смещению огибающей вверх (т.е. появлению дополнительной постоянной составляющей в ней, вызванной помехой).

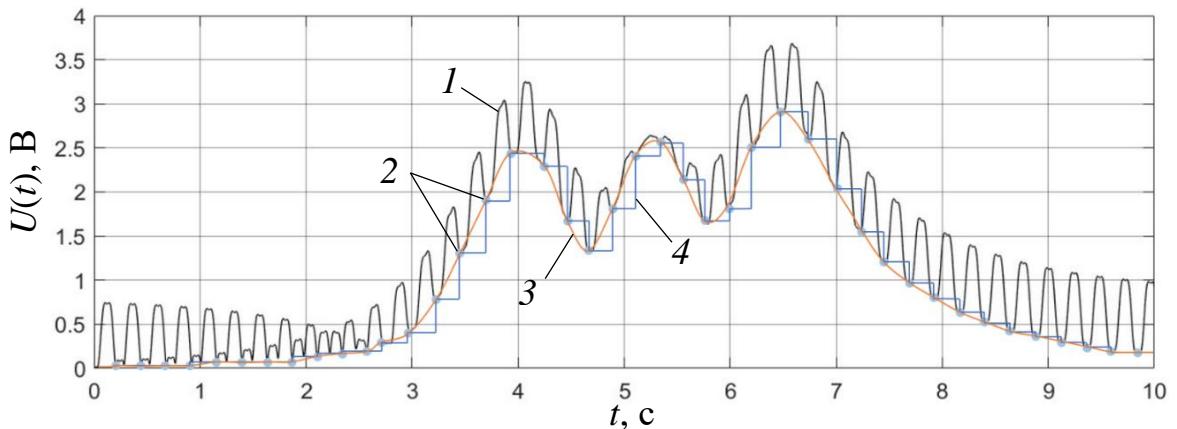


Рисунок 2.17 – Иллюстрация к определению аппроксимированной границы зоны нечувствительности:

- 1 – огибающая аддитивной смеси сигнала и гармонической помехи от ЛЭП;
- 2 – «опорные точки» – минимумы огибающей сигнала;
- 3 – идеальная ГЗН; 4 – аппроксимированная ГЗН

Для наиболее эффективного подавления постоянной составляющей от гармонической помехи зона нечувствительности в ПГП должна иметь границу зоны нечувствительности (ГЗН) (назовем ее идеальной ГЗН), показанную на рисунке 2.17. На практике расчет идеальной ГЗН затруднителен, поскольку закон ее изменения во времени неизвестен и зависит от многих факторов (скорости движения локомотива в зоне влияния ЛЭП, угла пересечения ЛЭП и

железнодорожной линии, геометрического расположения проводов ЛЭП и токов в них, и др.). Определить значения ГЗН можно только в отдельных «опорных» точках – минимумах огибающей сигнала (рисунок 2.17). В промежуточные моменты времени между «опорными» точками ГЗН может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону.

При использовании «опорных» точек можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию идеальной ГЗН; в этом случае аппроксимированная ГЗН будет иметь ступенчатый характер. Естественно, такая аппроксимация характеризуется определенной погрешностью, приводящей к искажению формы огибающей на выходе ПГП. Величина погрешности в данном случае зависит от длительности интервалов времени между «опорными» точками и скорости изменения идеальной ГЗН на этих интервалах.

График огибающей сигнала на выходе ПГП при определении ГЗН описанным выше способом (по «опорным» точкам) представлен на рисунке 2.18.

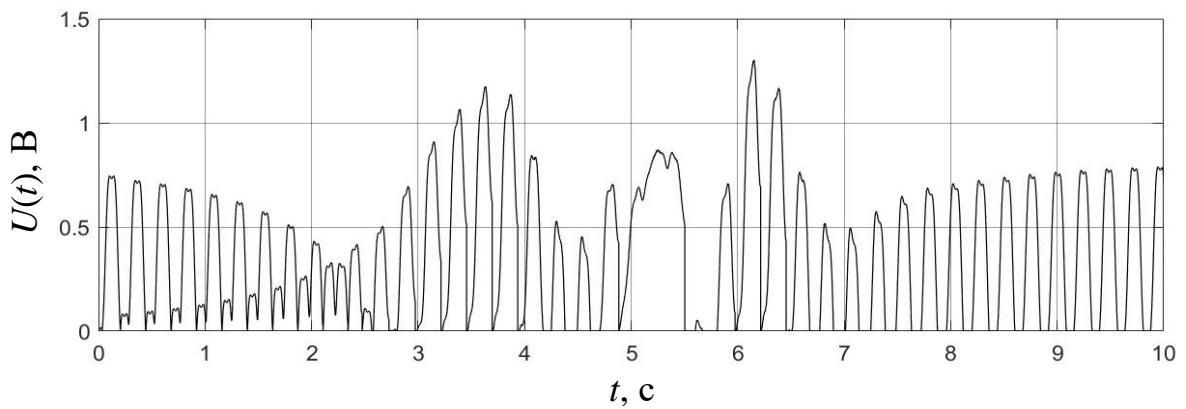


Рисунок 2.18 – График огибающей сигнала на выходе ПГП

График демонстрирует эффективность такого способа расчета границы зоны нечувствительности и применения блока с зоной нечувствительности в приемнике канала АЛСН для подавления ГП от высоковольтной ЛЭП. Очевидно, данный способ будет эффективен и при наличии стационарной ГП с частотой, попадающей в рабочий диапазон частот канала АЛСН.

## 2.3 Разработка алгоритма функционирования квадратурного приемника с нелинейными преобразованиями сигнала

В соответствии со способом поэлементного приема сигналов АЛСН, предложенным в п.п. 2.1, а также способом подавления импульсных помех на основе нелинейного преобразования и методикой определения порога амплитудного ограничения или бланкирования, предложенными в п.п. 2.2, алгоритм обработки сигнала АЛСН с применением квадратурного амплитудного детектирования огибающей и восстановления ее амплитуды, нелинейных подавителей импульсных и гармонических помех (КПИГП) будет содержать следующие основные операции по обработке входного сигнала:

- 1) широкополосная частотная фильтрация;
- 2) нелинейное преобразование сигнала посредством амплитудного ограничения или бланкирования для подавления ИП (в ПИП);
- 3) узкополосная частотная фильтрация;
- 4) КАДВ;
- 5) нелинейное преобразование сигнала посредством зоны нечувствительности для подавления ГП (в ПГП);
- 6) сравнение мгновенного значения огибающей с порогом принятия решения и формирование логического импульса или интервала сигнала АЛСН на выходе приемника.

Рассмотрим алгоритм функционирования КПИГП, блок-схема которого представлена на рисунке 2.19.

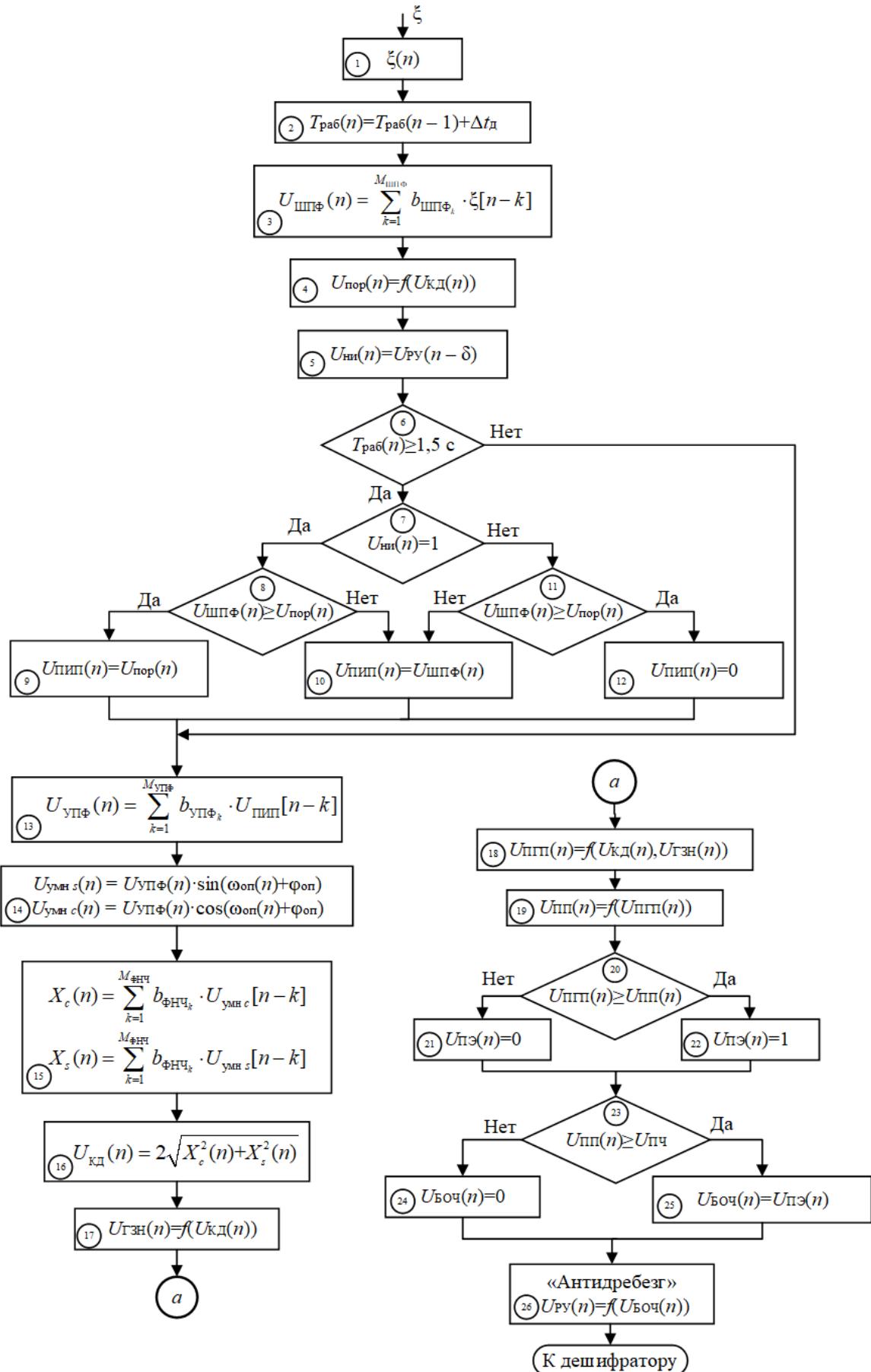


Рисунок 2.19 – Блок-схема алгоритма функционирования КПИГП

Предлагаемый алгоритм состоит из выполнения следующих шагов.

- Шаг 1. Формируется отсчет  $\xi(n)$  смеси сигнала АЛСН и помех на выходе последовательно включенных ЛПК.
- Шаг 2. Время  $T_{\text{раб}}(n)$  работы приемника увеличивается на длительность  $\Delta t_{\text{д}}$  интервала дискретизации сигнала; в момент включения приемника  $T_{\text{раб}}(0) = 0$ .
- Шаг 3. Осуществляется частотная фильтрация принимаемой смеси сигнала и помех посредством широкополосного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра);  $b_{\text{ШПФ}k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{ШПФ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 4. Определяется порог  $U_{\text{пор}}(n)$  амплитудного ограничения или бланкирования по максимальному значению величины огибающей  $U_{\text{КД}}(n)$  сигнала, формируемой в результате квадратурного детектирования.
- Шаг 5. Формируется признак  $U_{\text{ни}}(n)$  наличия на входе АО и БУ импульса принимаемого сигнала АЛСН путем задержки сигнала  $U_{\text{РУ}}(n)$  с выхода порогового решающего устройства (РУ) приемника на  $\delta$  отсчетов.
- Шаг 6. Проверяется время работы приемника: если  $T_{\text{раб}}(n) \geq 1,5$  с, то  $U_{\text{пор}}(n)$  определено с учетом амплитуды принимаемого сигнала АЛСН и можно осуществлять его амплитудное ограничение или бланкирование, осуществляется переход к шагу 7; в противном случае – переход к шагу 13.
- Шаг 7. Проверяется условие наличия импульса сигнала АЛСН: если «да», т.е.  $U_{\text{ни}}(n) = 1$ , то осуществляется переход к шагу 8; если «нет» –  $U_{\text{ни}}(n) \neq 1$  – то переход к шагу 11.
- Шаг 8. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ШПФ}}(n)$  величины  $U_{\text{пор}}(n)$ : если «да», т.е.  $U_{\text{ШПФ}}(n) \geq U_{\text{пор}}(n)$ , то осуществляется переход к шагу 9; если «нет» –  $U_{\text{ШПФ}}(n) < U_{\text{пор}}(n)$  – к шагу 10.
- Шаг 9. Осуществляется амплитудное ограничение:  $U_{\text{ПИП}}(n) = U_{\text{пор}}(n)$ .

- Шаг 10. Бланкирование или амплитудное ограничение не осуществляется:  
 $U_{\text{пип}}(n) = U_{\text{ШПФ}}(n)$ .
- Шаг 11. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ШПФ}}(n)$  величины  $U_{\text{пор}}(n)$ : если «да», т.е.  $U_{\text{ШПФ}}(n) \geq U_{\text{пор}}(n)$ , то осуществляется переход к шагу 12; если «нет» –  $U_{\text{ШПФ}}(n) < U_{\text{пор}}(n)$  – к шагу 10.
- Шаг 12. Осуществляется бланкирование:  $U_{\text{пип}}(n) = 0$ .
- Шаг 13. Осуществляется частотная фильтрация посредством узкополосного КИХ-фильтра;  $b_{\text{УПФ} k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{УПФ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 14. Производится перемножение величины  $U_{\text{ШПФ}}(n)$  и опорных колебаний в первом и втором квадратурных каналах: вычисляются  $U_{\text{УМН} s}(n)$  и  $U_{\text{УМН} c}(n)$  соответственно.
- Шаг 15. Вычисляются квадратурные составляющие  $X_c$  и  $X_s$  комплексной огибающей сигнала путем частотной фильтрации КИХ-фильтрами низких частот (ФНЧ);  $b_{\text{ФНЧ} k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{ФНЧ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 16. По квадратурным составляющим вычисляется результат квадратурного детектирования  $U_{\text{КД}}(n)$  – огибающая принимаемого сигнала и восстанавливается ее амплитуда.
- Шаг 17. По огибающей сигнала вычисляется граница зоны нечувствительности  $U_{\text{ГЗН}}(n) = f(U_{\text{КД}}(n))$
- Шаг 18. В соответствии с вычисленной ГЗН осуществляется нелинейное преобразование в ПГП:  $U_{\text{ПГП}}(n) = f(U_{\text{КД}}(n), U_{\text{ГЗН}}(n))$
- Шаг 19. Вычисляется плавающий порог принятия решения  $U_{\text{ПП}}(n) = f(U_{\text{ПГП}}(n))$ .
- Шаг 20. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ПГП}}(n)$  величины плавающего порога: если «да», т.е.  $U_{\text{ПГП}}(n) \geq U_{\text{ПП}}(n)$ , то переход к шагу 22; если «нет» –  $U_{\text{ПГП}}(n) < U_{\text{ПП}}(n)$  – то переход к шагу 21.

- Шаг 21. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  на выходе порогового элемента (ПЭ) решающего устройства принимает значение логического нуля.
- Шаг 22. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  принимает значение логической единицы.
- Шаг 23. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ПП}}(n)$  значения  $U_{\text{ПЧ}}$ , соответствующего задаваемому порогу чувствительности приемника. Если «да», т.е.  $U_{\text{ПП}}(n) \geq U_{\text{ПЧ}}$ , то переход к шагу 25; если «нет» –  $U_{\text{ПП}}(n) < U_{\text{ПЧ}}$  – то переход к шагу 24.
- Шаг 24. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 25. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 26. Выполняется функция «антидребезг»: в величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  игнорируются импульсы (идущие подряд единичные отсчеты) и интервалы (идущие подряд нулевые отсчеты) длительностью менее 70 мс. В результате формируется выходная величина  $U_{\text{РУ}}(n)$  приемника – логический сигнал передаваемой кодовой комбинации АЛСН, поступающий для дальнейшей обработки на вход локомотивного дешифратора.

Для независимой оценки эффективности применения КАДВ и каждого из нелинейных преобразований сигнала (в ПИП и ПГП) дополнительно составлены алгоритмы функционирования следующих приемников:

- 1) приемник с КАДВ без нелинейных преобразований (отсутствуют ПИП и ПГП) – КП;
- 2) приемник с КАДВ и ПГП (отсутствует ПИП) – КПГП;

3) приемник с КАДВ и ПИП (отсутствует ПГП) – КПИП.

Алгоритм функционирования КП, в отличие от алгоритма функционирования КПИГП (см. рисунок 2.19), не содержит шаги со 2 по 13, 17 и 18 (рисунок П1.1 Приложения 1); алгоритм функционирования КПГП не содержит шаги со 2 по 13 (рисунок П1.2 Приложения 1); алгоритм функционирования КПИП не содержит шаги 17 и 18 (рисунок П1.3 Приложения 1).

Для экспериментальной оценки качества функционирования и помехоустойчивости вышеперечисленных приемников целесообразно проведение исследований с использованием метода имитационного моделирования на ЭВМ.

## 2.4 Выводы по второй главе

1. Установлено, что оптимальный корреляционный приемник сигналов АЛСН, осуществляющий «прием в целом», не способен обеспечить достоверное различение сигналов АЛСН даже при идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации принимаемого и опорных сигналов и отсутствии помех. Предложено использовать поэлементный прием сигнала АЛСН с квадратурным амплитудным детектированием огибающей и восстановлением ее амплитуды. Такой способ приема вследствие инвариантности результата детектирования к начальной фазе принимаемого несущего колебания позволяет отказаться от системы фазовой автоподстройки частоты опорных колебаний, что снижает сложность приемника, а восстановление амплитуды огибающей позволяет устранить снижение его чувствительности.

2. Для эффективного подавления импульсных помех и уменьшения негативного эффекта подавления сигнала предложен способ на основе нелинейного преобразования, отличающийся применением амплитудного ограничения в импульсах сигнала АЛСН и бланкирования в его интервалах. Для реализации предложенного способа разработана методика определения порога амплитудного ограничения или бланкирования, учитывая временные параметры сигнала АЛСН и условия его распространения по рельсовой линии

посредством коэффициента запаса по порогу, значение которого, определённое для наихудших условий (при максимальных значениях длины рельсовой линии и скорости поезда) равно 1,083.

3. Для подавления гармонических помех эффективным является применение нелинейности с зоной нечувствительности после амплитудного детектирования огибающей сигнала АЛСН.

4. Разработан алгоритм обработки сигнала АЛСН с применением квадратурного амплитудного детектирования огибающей и восстановления ее амплитуды, нелинейных подавителей импульсных и гармонических помех. Для получения независимых оценок эффективности их применения составлены алгоритмы функционирования квадратурных приемников: без применения нелинейных преобразований; с нелинейным подавлением импульсных помех; с нелинейным подавлением гармонических помех; с нелинейным подавлением как импульсных, так и гармонических помех.

## 3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ АЛСН

### 3.1 Разработка имитационных моделей приемников сигналов АЛСН

Согласно [95], под имитационным моделированием понимается процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы.

На основе алгоритма функционирования квадратурного приемника с нелинейными преобразованиями сигнала, представленного на рисунке 2.19, в среде имитационного моделирования Simulink [96] разработаны имитационные модели четырех квадратурных приемников (КП, КПГП, КПИП, КПИГП), позволяющие экспериментально исследовать процесс их функционирования при воздействии различных дестабилизирующих факторов, а также получить количественные оценки их помехоустойчивости [97].

Для проведения сравнительной экспериментальной оценки помехоустойчивости квадратурных приемников использована имитационная модель известного приемника с амплитудным детектированием на основе скользящего окна и вычитающим устройством (АДВУ) [27].

Во всех имитационных моделях сигналы и помехи формируются и обрабатываются с частотой дискретизации 2 кГц, аналогично существующему приемнику канала АЛСН комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У. Модели построены для обработки сигнала АЛСН с частотой несущей 50 Гц. Для иной частоты несущей (25 или 75 Гц) модели потребуют незначительной перенастройки.

На рисунке 3.1 представлена блок-схема имитационной модели КПИГП. Имитационные модели остальных приемников отличаются тем, что в них отсутствуют блоки, моделирующие обработку сигнала в ПИП и ПГП, не имеющихся в этих приемниках.

Имитационная модель КПИГП содержит следующие блоки:

- блок КА, в котором пользователь может вручную задавать в относительных единицах коэффициент асимметрии приемного тракта канала АЛСН;
- модели локомотивных приемных катушек ЛПК1 и ЛПК2, в которых учитывается согласное включение катушек для сигнала АЛСН и встречное – для помех, индуцируемых тяговым током;
- сумматор (С);
- подавитель импульсных помех ПИП;
- квадратурный детектор огибающей (КД);
- подавитель гармонических помех ПГП;
- пороговое решающее устройство РУ.

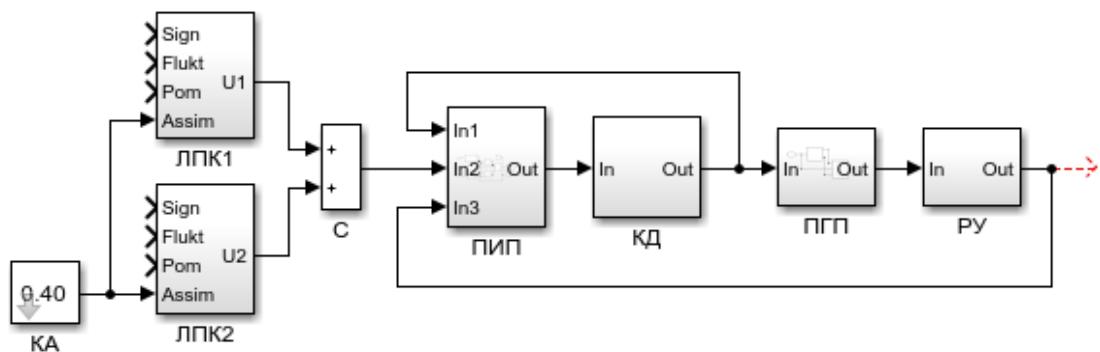


Рисунок 3.1 – Блок-схема имитационной модели приемника с подавителем импульсных помех, квадратурным амплитудным детектором и подавителем гармонических помех

Модели ЛПК1 и ЛПК2 формируют смесь сигнала и помех, действующую на выходе соответствующей ЛПК, с учетом коэффициента асимметрии приемного тракта. Асимметрия приемного тракта включает в себя продольную асимметрию рельсовой линии, асимметрию электрических и магнитных параметров

локомотивных приемных катушек ЛПК1 и ЛПК2, а также асимметрию их расположения относительно рельсов, обусловленную несимметрией их подвеса на локомотиве и колебаниями кузова локомотива в процессе движения [31]. Сумматор С моделирует последовательное включение ЛПК, ЭДС на выходе которых суммируются и поступают на вход приемника в виде смеси  $\xi(n)$ . Тем самым выполняется шаг 1 алгоритма функционирования приемника (см. рисунок 2.19).

Блок-схема имитационной модели ПИП представлена на рисунке 3.2.

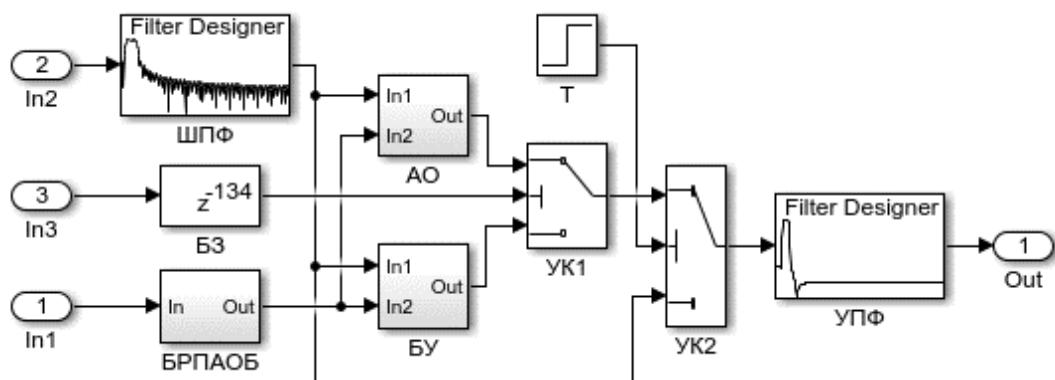


Рисунок 3.2 – Блок-схема имитационной модели подавителя импульсных помех

Модель ПИП содержит порты ввода-вывода сигналов (In1-In3, Out), ШПФ, блок задержки (БЗ), блок расчета порога амплитудного ограничения или бланкирования (БРПАОБ), АО, БУ, таймер (Т), управляемые ключи (УК1 и УК2), УПФ. ПИП реализует шаги 2-13 алгоритма функционирования приемника. Таймер Т запускается в момент включения приемника и осуществляет подсчет времени  $T_{\text{раб}}(n)$  его работы, реализуя шаг 2 алгоритма функционирования приемника. ШПФ представляет собой цифровой нерекурсивный фильтр 96 порядка с фильтрующим окном Кайзера и полосой пропускания от 15 до 85 Гц на уровне минус 6 дБ, что обусловлено необходимостью предварительного (до амплитудного ограничения или бланкирования) подавления низкочастотной помехи от боковой качки и гармоник тягового тока с частотами 100 и более Гц в канале АЛСН. ШПФ реализует шаг 3 алгоритма функционирования приемника. БЗ формирует признак  $U_{\text{ни}}(n)$  наличия на входе АО и БУ импульса принимаемого сигнала АЛСН путем

задержки сигнала  $U_{РУ}(n)$  с выхода РУ на  $\delta$  отсчетов. В разработанной модели  $\delta = 134$ . Б3 реализует шаг 5 алгоритма функционирования приемника. БРПАОБ рассчитывает значение порога  $U_{пор}(n)$  амплитудного ограничения или бланкирования по сигналу  $U_{КД}(n)$  с выхода квадратурного детектора и реализует тем самым шаг 4 алгоритма функционирования приемника. АО осуществляет амплитудное ограничение сигнала, реализуя шаги 8-10 алгоритма функционирования приемника. БУ осуществляет бланкирование сигнала, реализуя шаги 10-12 алгоритма функционирования приемника. УК1 осуществляет проверку условия  $U_{ни}(n) = 1$ , реализуя шаг 7 алгоритма функционирования приемника. УК2 осуществляет проверку условия  $T_{раб}(n) \geq 1,5$  с, реализуя шаг 6 алгоритма функционирования приемника. УПФ представляет собой цифровой нерекурсивный фильтр 512 порядка с фильтрующим окном Кайзера и полосой пропускания от 38 до 62 Гц на уровне минус 6 дБ. УПФ реализует шаг 13 алгоритма функционирования приемника.

Блок-схема имитационной модели КД представлена на рисунке 3.3.

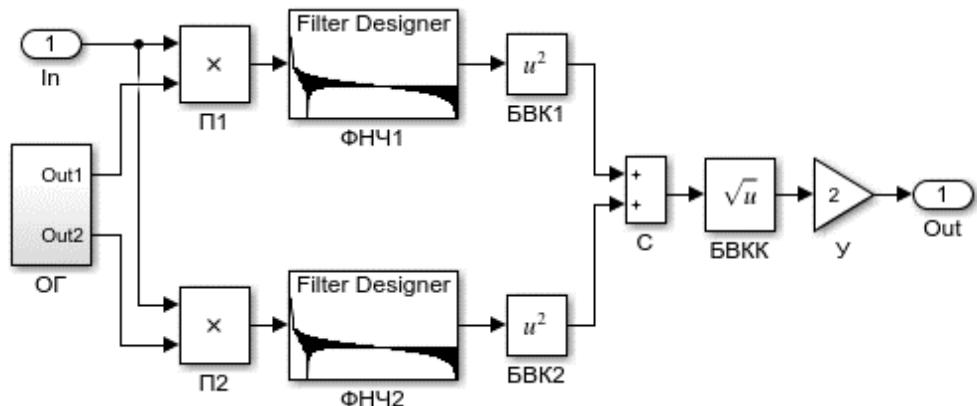


Рисунок 3.3 – Блок-схема имитационной модели квадратурного амплитудного детектора

Модель КД содержит порты ввода-вывода сигналов (In, Out), опорный генератор (ОГ), перемножители ( $\Pi_1, \Pi_2$ ) первого и второго квадратурных каналов соответственно, фильтры низких частот ( $\Phi\text{НЧ1}, \Phi\text{НЧ2}$ ), блоки возведения в квадрат (БВК1, БВК2), сумматор С, блок вычисления квадратного корня (БВКК) и

усилитель (У). ОГ формирует на своих выходах Out1 и Out2 опорные колебания  $\cos(\omega_{\text{оп}}t + \phi_{\text{оп}})$  и  $\sin(\omega_{\text{оп}}t + \phi_{\text{оп}})$  частотой 50 Гц. П1 и П2 реализуют шаг 14 алгоритма функционирования приемника. ФНЧ1 и ФНЧ2 идентичны и представляют собой цифровые нерекурсивные фильтры 256-го порядка. Используется фильтрующее окно Кайзера. Частота среза для обоих ФНЧ составляет 12 Гц. Уровень первого бокового лепестка не превышает минус 40 дБ по отношению к уровню главного лепестка. ФНЧ1 и ФНЧ2 реализуют шаг 15 алгоритма функционирования приемника. Блок У с коэффициентом усиления, равным двум, осуществляет восстановление амплитуды огибающей и совместно с блоками БВК1, БВК2, С и БВКК реализует шаг 16 алгоритма функционирования приемника. Таким образом, на выходе блока КД имитационной модели приемника формируются отсчеты функции  $2X(t)$ , представляющей собой восстановленную по амплитуде огибающую принимаемого кодового сигнала АЛСН.

Блок-схема имитационной модели ПГП представлена на рисунке 3.4.

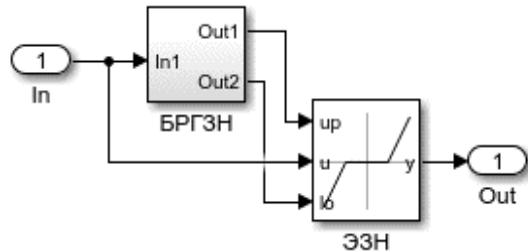


Рисунок 3.4 – Блок-схема имитационной модели подавителя гармонических помех

Модель ПГП содержит порты ввода-вывода сигналов (In, Out), блок расчета границы зоны нечувствительности (БРГЗН) и элемент с зоной нечувствительности (ЭЗН). БРГЗН по сигналу огибающей с выхода КД осуществляет расчет значений верхней и нижней границы зоны нечувствительности, поступающих соответственно с верхнего и нижнего выходов БРГЗН на верхний и нижний входы ЭЗН. Тем самым БРГЗН реализует шаг 17 алгоритма функционирования приемника. На выходе ЭЗН формируется величина  $U_{\text{ПГП}}(n)$  огибающей с

подавленной постоянной составляющей от гармонической помехи и тем самым реализуется шаг 18 алгоритма функционирования приемника.

Блок-схема имитационной модели РУ представлена на рисунке 3.5.

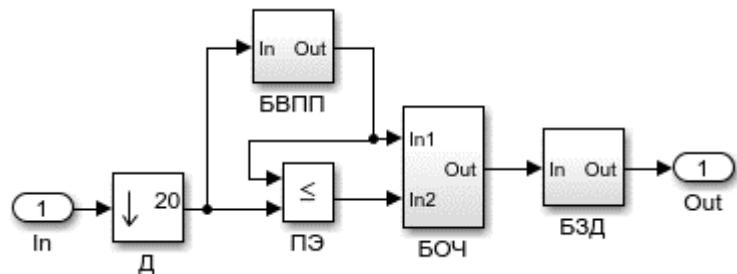


Рисунок 3.5 – Блок-схема имитационной модели порогового решающего устройства

Модель РУ содержит порты ввода-вывода сигналов (In, Out), дециматор (Д), блок вычисления плавающего порога принятия решения (БВПП), пороговый элемент ПЭ, блок ограничения чувствительности БОЧ и блок защиты от «дребезга» (БЗД). Для увеличения быстродействия устройства обработки сигналов АЛСН блок Д осуществляет снижение частоты дискретизации огибающей  $U_{\text{ПГП}}(n)$  в 20 раз, с 2 кГц до 100 Гц. БВПП рассчитывает значение  $U_{\text{ПП}}(n)$  плавающего порога принятия решения, реализуя шаг 19 алгоритма функционирования приемника. На выходе ПЭ по результату сравнения величин  $U_{\text{ПГП}}(n)$  и  $U_{\text{ПП}}(n)$  (шаг 20 алгоритма функционирования приемника) формируется величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$ , принимающая нулевое (шаг 21 алгоритма) или единичное (шаг 22 алгоритма) логическое значение. Далее в БОЧ величина  $U_{\text{ПП}}(n)$  сравнивается со значением  $U_{\text{ПЧ}}$ , задающим порог чувствительности приемника (шаг 23 алгоритма). На выходе БОЧ по результату формируется величина  $U_{\text{БОЧ}}(n)$ , принимающая нулевое (сигнал ниже порога чувствительности, шаг 24 алгоритма) или единичное (сигнал равен или превышает порог чувствительности, шаг 25 алгоритма) логическое значение.

С выхода БОЧ сигнал подается на вход БЗД, который реализует функцию «антидребезг», не пропуская на свой выход импульсы и паузы сигнала

длительностью менее 70 мс. Тем самым реализуется шаг 26 алгоритма функционирования приемника.

Имитационные модели приемников КП, КПГП и КПИП представлены на рисунках П2.1-П2.2 Приложения 2. Они отличаются от рассмотренной выше имитационной модели приемника КПИГП тем, что в них отсутствуют блоки ПИП и ПГП, блок ПИП и блок ПГП соответственно.

Блок-схема имитационной модели приемника АДВУ представлена на рисунке 3.6.

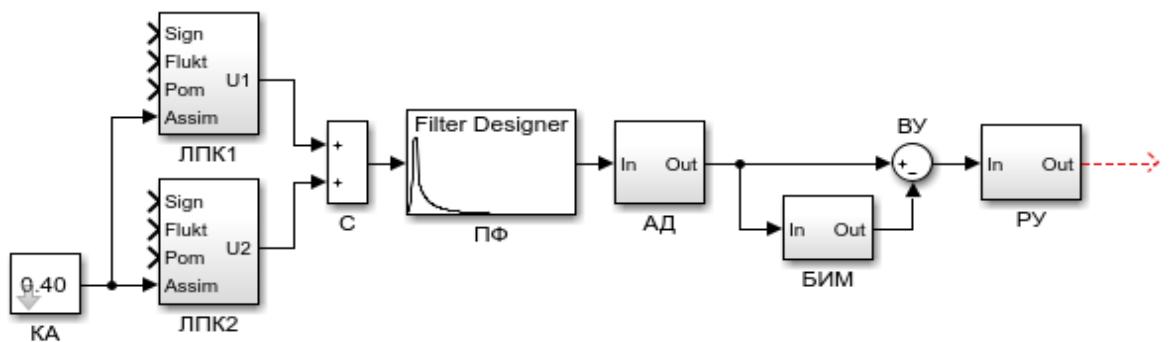


Рисунок 3.6 – Блок-схема имитационной модели приемника с амплитудным детектированием на основе скользящего окна и вычитающим устройством

В данной модели блоки KA, ЛПК1, ЛПК2 и С идентичны аналогичным блокам в моделях приемников КП, КПГП, КПИП и КПИГП. Полосовой фильтр ПФ представляет собой цифровой нерекурсивный фильтр 512 порядка с фильтрующим окном Кайзера и полосой пропускания от 38 до 62 Гц на уровне минус 6 дБ; по частотным характеристикам он идентичен фильтрам УПФ в моделях других приемников. Блок АД является имитационной моделью амплитудного детектора на основе скользящего окна. В АД посредством буфера с перекрытием формируется скользящее окно, в котором определяется отсчет с максимальным значением, и это значение выдается на выход АД. В блоке измерения минимумов (БИМ) также с применением скользящего окна измеряются минимумы огибающей, которые затем поступают на нижний вход вычитающего устройства (ВУ), где вычитываются из огибающей, поступающей на левый вход ВУ. Таким образом осуществляется

компенсация гармонической помехи с частотой, находящейся в полосе пропускания ПФ. Решающее устройство РУ приёма АДВУ аналогично РУ остальных приемников.

Разработанные имитационные модели пяти приемников (АДВУ, КП, КПГП, КПИП, КПИГП) воспроизводят алгоритмы их функционирования и позволяют путем подачи на их входы различных сигналов и помех исследовать их работу в произвольных задаваемых условиях. Эти модели будут использованы далее для оценки качества функционирования приемников в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов (нестабильности частоты несущего колебания, аддитивных флюктуационных, импульсных помех и гармонической помехи от ЛЭП).

### **3.2 Исследование процесса функционирования приемников в номинальных условиях эксплуатации**

Цель исследования заключается в оценке качества функционирования представленных в главе 2 квадратурных приемников (КП, КПГП, КПИП, КПИГП) в номинальных условиях эксплуатации. Под номинальными понимались условия, когда на входе приемника отсутствуют помехи, принимается только сигнал АЛСН, напряжение которого соответствует номинальному значению на входе блока электроники БЭЛ2М2 комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У от приемных катушек [98]:

- 280 мВ среднеквадратического значения (СКЗ) (396 мВ амплитудного значения) при электротяге постоянного тока на несущей частоте 50 Гц;
- 100 мВ СКЗ (141 мВ амплитудного значения) на несущей частоте 25 Гц;
- 300 мВ СКЗ (424 мВ амплитудного значения) на несущей частоте 75 Гц.

Согласно поставленной цели, в исследовании посредством экспериментов на разработанных имитационных моделях приемников решались следующие задачи:

- 1) оценка пороговой чувствительности квадратурных приемников (при частоте несущей 50 Гц);

2) оценка качества функционирования приемников в условиях нестабильности частоты несущего колебания сигнала АЛСН.

### 3.2.1 Оценка пороговой чувствительности квадратурных приемников

Пороговая чувствительность квадратурных приемников в данном эксперименте определяется как минимальное СКЗ напряжения сигнала на входе приемников, при котором они осуществляют достоверный прием.

Методика оценки пороговой чувствительности состоит в следующем. На вход приемников подается сигнал АЛСН амплитудой 396 мВ при частоте несущей 50 Гц. По осцилограммам на выходе приемников определяется отсутствие ошибок в приеме. Затем амплитуда входного сигнала последовательно уменьшается с шагом 1 мВ до тех пор, пока не возникнет ошибки в приеме (уменьшение или увеличение количества импульсов в кодовой комбинации). Наименьшее достигнутое СКЗ сигнала, при котором приемники еще осуществляют безошибочный прием, определяет их пороговую чувствительность.

Результаты эксперимента с подачей на вход квадратурных приемников всех шести кодовых сигналов АЛСН с частотой несущей 50 Гц представлены в таблице 3.1. Все участвовавшие в эксперименте приемники показали идентичные результаты.

Таблица 3.1 – Пороговая чувствительность квадратурных приемников

Кодовый сигнал	Пороговая чувствительность, СКЗ, мВ
«З <sub>1,6</sub> »	171,83
«Ж <sub>1,6</sub> »	170,40
«КЖ <sub>1,6</sub> »	176,00
«З <sub>1,86</sub> »	171,83
«Ж <sub>1,86</sub> »	171,83
«КЖ <sub>1,86</sub> »	190,20

Таким образом, итоговая пороговая чувствительность квадратурных приемников на совокупности всех кодовых сигналах оказалась равной 190,2 мВ

СКЗ. Согласно [98], пороговая чувствительность локомотивного приемника канала АЛСН в устройстве КЛУБ-У при несущей частоте сигнала 50 Гц должна составлять 180-220 мВ СКЗ. Следовательно, пороговая чувствительность исследованных квадратурных приемников соответствует данному требованию.

### 3.2.2 Оценка устойчивости функционирования квадратурных приемников при нестабильности частоты несущего колебания

Как было отмечено ранее в п. 2.1, несовпадение частот несущего и опорных колебаний может приводить к снижению амплитуды огибающей принимаемого сигнала на выходе КД, что негативно скажется на устойчивости функционирования квадратурных приемников. Под устойчивостью функционирования приемников будем понимать их способность выполнять требуемую функцию (достоверный прием сигналов АЛСН) в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

В этой связи представляет практический интерес измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) КД в области допустимых отклонений частот несущих от номинальных значений (25, 50 и 75 Гц). Экспериментальное измерение АЧХ будем осуществлять как модуля  $K_{\text{КД}}(f_{\text{н}})$  комплексного коэффициента передачи КД с помощью его имитационной модели (см. рисунок 3.3) методом измерения «по точкам» [99]. Согласно этому методу

$$K_{\text{КД}}(f_{\text{н}}) = \frac{U_{\text{КД вых}}(f_{\text{н}})}{U_{\text{КД вх}}(f_{\text{н}})},$$

где  $U_{\text{КД вх}}(f_{\text{н}})$ ,  $U_{\text{КД вых}}(f_{\text{н}})$  – амплитуды соответственно входного и выходного гармонического сигнала детектора с частотой колебаний  $f_{\text{н}}$ .

Амплитуда гармонического сигнала, подаваемого на вход квадратурного детектора, задается равной 396 мВ при частоте колебаний в области 50 Гц, 141 мВ при частоте колебаний в области 25 Гц и 424 мВ при частоте колебаний в области 75 Гц.

Для кодирования рельсовых цепей сигналами АЛСН частотой 25 Гц используется преобразовательная панель ПП25-ЭЦК, содержащая

параметрические преобразователи частоты ПЧ50/25 с частотой выходного напряжения  $(25 \pm 0,5)$  Гц [100]. Панель преобразовательная ПП50-ЦАБ обеспечивает частоту напряжения питания путевых устройств АЛС  $(50 \pm 1)$  Гц, ПП75-ЦАБ обеспечивает частоту  $(75 \pm 0,5)$  Гц. Соответственно, с двукратным запасом по указанным диапазонам частот, АЧХ КД при частоте несущей сигнала АЛСН 25 Гц будем определять в диапазоне частот от 24 до 26 Гц, при частоте несущей 50 Гц – в диапазоне от 48 до 52 Гц, а при частоте несущей 75 Гц – в диапазоне от 74 до 76 Гц.

Величина  $U_{\text{КД вых}}(f_{\text{н}})$  в эксперименте измерялась с помощью осциллографа, подключенного к выходу модели КД. Уменьшение смещения оценки  $U_{\text{КД вых}}(f_{\text{н}})$  в установившемся режиме работы имитационной модели КД, вызванного воздействием начальных условий, осуществлялось с помощью метода, при котором начало измерения задерживается до момента завершения переходного процесса на выходе КД.

Для наглядности все три измеренные АЧХ КД были сведены на одном рисунке 3.7 в виде графиков зависимостей  $K_{\text{КД}}(\Delta f_{\text{н}}) = \frac{U_{\text{КД вых}}(\Delta f_{\text{н}})}{U_{\text{КД вх}}(\Delta f_{\text{н}})}$ , где  $\Delta f_{\text{н}} = f_{\text{н}} - f_{\text{н ном}}$  – отклонение частоты гармонического сигнала на входе КД от номинального значения частоты несущей сигнала АЛСН.

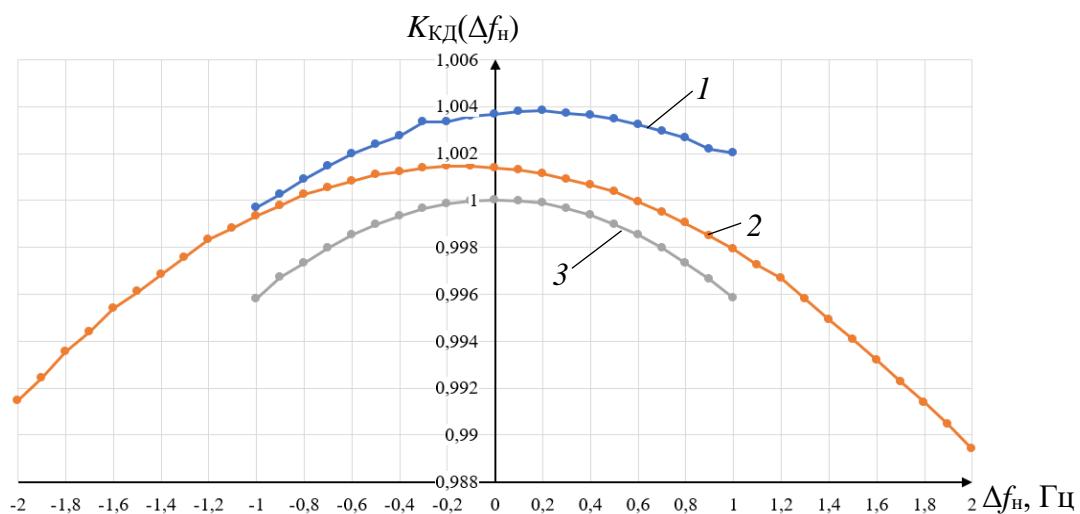


Рисунок 3.7 – АЧХ квадратурного детектора при номинальной частоте несущей:

1 – 25 Гц, 2 – 50 Гц, 3 – 75 Гц

Представленные на рисунке 3.7 графики указывают, что с увеличением абсолютного значения  $\Delta f_n$  амплитуда сигнала на выходе КД будет снижаться, что закономерно и объясняется частотной селективностью квадратурного детектирования вследствие наличия в квадратурных каналах КД фильтров низких частот.

Результаты измерения  $K_{\text{КД}}(f_n)$  показывают, что при отклонении частоты несущей принимаемого сигнала от ее номинального значения в пределах допустимых значений, коэффициент передачи КД изменяется:

- при  $f_{n \text{ ном}} = 25 \text{ Гц}$  – с 1,00367 до 1,00238, или на 0,13 %;
- при  $f_{n \text{ ном}} = 50 \text{ Гц}$  – с 1,00138 до 0,99793, или на 0,35 %;
- при  $f_{n \text{ ном}} = 75 \text{ Гц}$  – с 1,00001 до 0,99897, или на 0,10 %.

При отклонении частоты несущей принимаемого сигнала от ее номинального значения, в два раза превышающем допустимое, коэффициент передачи КД изменяется:

- при  $f_{n \text{ ном}} = 25 \text{ Гц}$  – с 1,00367 до 0,99968, или на 0,40 %;
- при  $f_{n \text{ ном}} = 50 \text{ Гц}$  – с 1,00138 до 0,98942, или на 1,21 %;
- при  $f_{n \text{ ном}} = 75 \text{ Гц}$  – с 1,00001 до 0,99582, или на 0,42 %.

Таким образом, АЧХ квадратурного детектора в рассмотренных диапазонах частот близка к линейной и отклонение частоты несущей принимаемого сигнала АЛСН от номинального значения не будет оказывать значимого влияния на устойчивость функционирования квадратурных приемников.

Оценим далее устойчивость функционирования квадратурных приемников при отклонении частоты несущей принимаемого сигнала от номинального значения. В качестве показателей устойчивости функционирования квадратурных приемников примем максимально допустимые абсолютную  $\Delta f_{n \text{ max}}$  и относительную  $\delta f_{n \text{ max}}$  нестабильность частоты  $f_n$  несущей сигнала АЛСН при ее отклонении от номинального значения  $f_{n \text{ ном}}$  (при которых приемники функционируют без ошибок):

$$\Delta f_{n \text{ max}} = \max(|f_{n \text{ уст min}} - f_{n \text{ ном}}|, (f_{n \text{ уст max}} - f_{n \text{ ном}})),$$

$$\delta f_{n \text{ max}} = (\Delta f_{n \text{ max}}/f_{n \text{ ном}}) \cdot 100 \%,$$

где  $f_{\text{н уст min}}$ ,  $f_{\text{н уст max}}$  – соответственно наименьшая и наибольшая частоты несущей принимаемого сигнала, при которых приемники сохраняют устойчивость функционирования.

В эксперименте с применением имитационных моделей приемников уменьшение смещения оценок  $\Delta f_{\text{н max}}$ ,  $\delta f_{\text{н max}}$  и  $\delta U_{\text{КД}}$  в установившемся режиме работы приемников, вызванного воздействием начальных условий, осуществляется с помощью метода, при котором начало сбора данных задерживается до момента завершения переходного процесса (1,5 секунды с момента запуска имитационных моделей).

Сигнал АЛСН в зависимости от рода тяги может передаваться на частотах несущей 25, 50 или 75 Гц. В данном исследовании показатели устойчивости функционирования приемников определялись на всех указанных частотах.

Методика проведения эксперимента при определении  $\Delta f_{\text{н max}}$  и  $\delta f_{\text{н max}}$  следующая. Амплитуда несущей сигнала АЛСН «З<sub>1,6</sub>», подаваемого на вход квадратурных приемников, задается равной номинальному значению (396 мВ при частоте несущей 50 Гц, 141 мВ при частоте несущей 25 Гц и 424 мВ при частоте несущей 75 Гц). Затем частота несущей последовательно уменьшается (увеличивается) относительно номинального значения 25, 50 и 75 Гц до тех пор, пока на выходе приемников не появятся ошибки приема (уменьшение или увеличение количества импульсов в кодовой комбинации). В качестве  $\Delta f_{\text{н max}}$  берется минимальное из двух максимальных значений  $\Delta f_{\text{н}}$ , зафиксированных при увеличении и при уменьшении  $f_{\text{н}}$ , при которых еще не наблюдаются ошибки приема.

В качестве примера на рисунках 3.8 и 3.9 представлены осциллограммы, демонстрирующие сохранение и потерю устойчивости функционирования КПИГП при увеличении частоты несущей с 25 Гц до 34,2 Гц и 34,3 Гц соответственно. На обоих рисунках на верхнем графике изображен входной сигнал приемника (сигнал кодовой комбинации «З<sub>1,6</sub>»); на среднем – огибающая на выходе квадратурного детектора (кривая 1), плавающий порог принятия решения (кривая 2) и порог ограничения чувствительности приемника (прямая 3); на нижнем – сигнал на выходе приемника.

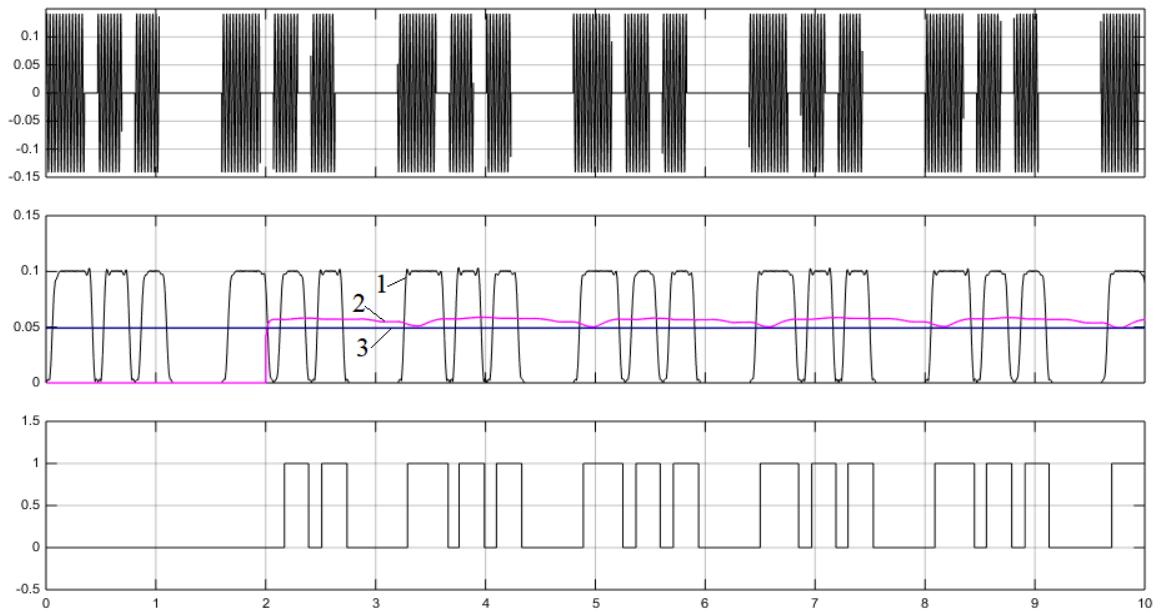


Рисунок 3.8 – Осциллограммы, демонстрирующие сохранение устойчивости функционирования КПИГП при частоте несущей 34,2 Гц

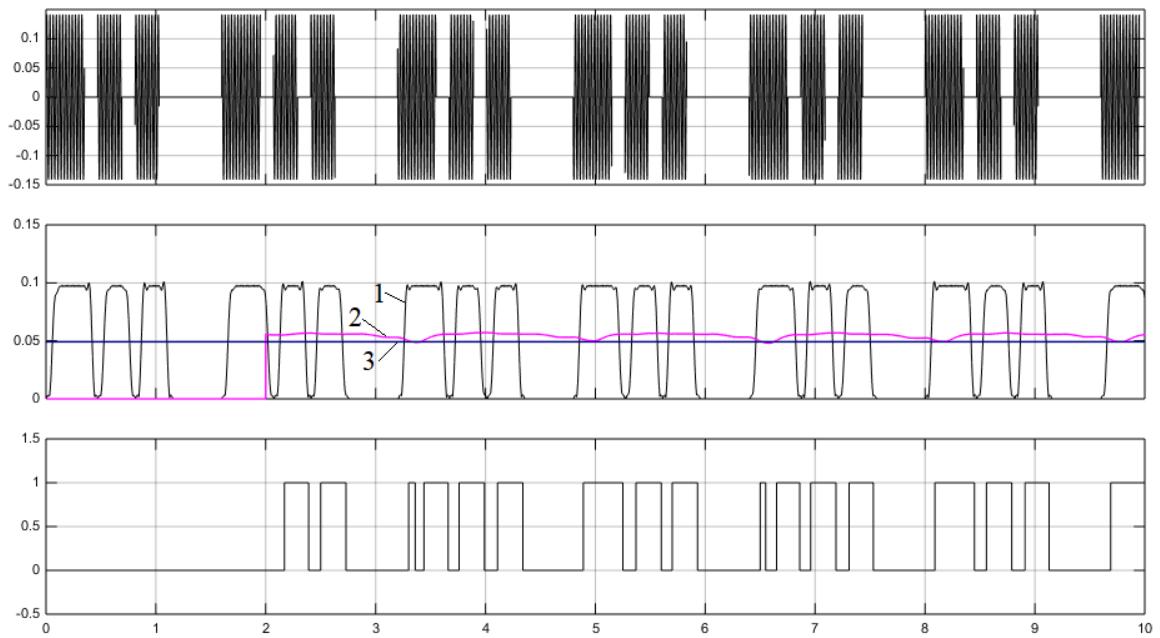


Рисунок 3.9 – Осциллограммы, демонстрирующие потерю устойчивости функционирования КПИГП при частоте несущей 34,3 Гц

Как видно из представленных осциллограмм, увеличение частоты несущей с 34,2 до 34,3 Гц привело к снижению амплитуды огибающей на выходе КД и, как следствие – к снижению плавающего порога принятия решения ниже порога ограничения чувствительности приемника, в результате чего на выходе приемника произошло дробление первого импульса кодовой комбинации «3<sub>1,6</sub>», т.е. – потеря устойчивости функционирования приемника.

Проведенный, согласно представленной методике, эксперимент показал результаты, представленные в таблице 3.2. Как видно из таблицы, с ростом частоты несущей абсолютное значение максимально допустимой нестабильности частоты увеличивается, а относительное – снижается. Все приемники допускают значительное (от 9,3 до 11,1 Гц) отклонение частоты несущей от номинального значения, достаточное для их устойчивого функционирования в реальных условиях эксплуатации.

Таблица 3.2 – Показатели устойчивости функционирования квадратурных приемников

Номинальная частота несущей $f_n$ , Гц	$f_n$ уст min, Гц	$f_n$ уст max, Гц	$\Delta f_n$ max, Гц	$\delta f_n$ max, %
25	15,7	34,3	9,3	37,2
50	40,5	59,5	9,5	19,0
75	63,2	86,1	11,1	14,8

Таким образом, по результатам проведенного исследования квадратурный детектор практически нечувствителен к отклонениям частоты несущей сигнала АЛСН от номинального значения, в два раза превышающим допустимые величины. Устойчивое функционирование квадратурных приемников обеспечивается при разности частот несущего и опорных колебаний 9 Гц, что говорит об отсутствии необходимости применения в них системы фазовой автоподстройки частоты опорных колебаний.

### **3.3 Сравнительная экспериментальная оценка помехоустойчивости и безопасности функционирования приемников при воздействии помех**

#### **3.3.1 Цель и задачи исследования**

Цель исследования заключается в получении количественных оценок помехоустойчивости и безопасности функционирования квадратурных приемников (КП, КПГП, КПИП, КПИГП) и АДВУ в условиях воздействия аддитивных флюктуационных, импульсных и гармонических помех и выборе приемника, обладающего наибольшей помехоустойчивостью и безопасностью функционирования.

В [101] дано следующее определение безопасности функционирования системы (устройства) ЖАТ – это свойство системы (устройства) ЖАТ обеспечивать технологическую безопасность и безопасное поведение при систематических и случайных отказах аппаратных или аппаратно-программных средств и внешних воздействиях, включая ошибки операторов. В соответствии с ним, под безопасностью функционирования исследуемых приемников в условиях воздействия внешних помех будем понимать их свойство обеспечивать технологическую безопасность системы АЛСН и ее безопасное поведение в указанных условиях. В данных условиях технологическая безопасность системы АЛСН и ее безопасное поведение будут обеспечиваться, если воздействие помех не приводит к увеличению риска появления более разрешающего, чем это допускается по условиям безопасности, сигнального показания на локомотивном светофоре АЛСН.

Сравнение помехоустойчивости и безопасности функционирования квадратурных приемников и АДВУ позволит по отдельности оценить эффективность применения в приемнике квадратурного амплитудного детектора, подавителя импульсных помех и подавителя гармонических помех при воздействии каждого из перечисленных видов помех.

Согласно поставленной цели, в данном пункте решались следующие задачи:

- 1) сравнительная оценка помехоустойчивости и безопасности функционирования приемников в условиях воздействия аддитивной ФП от постоянного тягового тока;
- 2) сравнительная оценка помехоустойчивости и безопасности функционирования приемников в условиях воздействия аддитивной ИП от постоянного тягового тока;
- 3) сравнительная оценка помехоустойчивости приемников в условиях воздействия аддитивной ГП от высоковольтной линии электропередачи.

С целью сокращения объема экспериментов данное исследование проводилось только при частоте несущей входного сигнала приемников, равной 50 Гц.

### **3.3.2 Методики проведения экспериментов при воздействии флюктуационной и импульсной помехи**

Суть экспериментов с воздействием флюктуационной помехи (ФП) и ИП заключалась в подаче на вход всех приемников одной и той же аддитивной смеси сигнала и помехи и подсчете числа допущенных каждым из приемников ошибок в приеме.

В экспериментах в качестве показателей помехоустойчивости исследуемых приемников приняты вероятность ошибки вида «слияние импульсов»  $P_{\text{сл}}$ , вероятность ошибки вида «ложный импульс»  $P_{\text{лож}}$ , вероятность ошибки вида «дробление импульса»  $P_{\text{др}}$ , вероятность ошибки вида «пропущенный импульс»  $P_{\text{проп}}$ , а также средняя вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$ , относящиеся к элементарному сигналу (символу) на выходе приемников, которые определяются в соответствии с выражениями:

$$P_{\text{сл}} = \frac{N_{\text{сл}}}{N_c}; \quad P_{\text{лож}} = \frac{N_{\text{лож}}}{N_c}; \quad P_{\text{др}} = \frac{N_{\text{др}}}{N_c}; \quad P_{\text{проп}} = \frac{N_{\text{проп}}}{N_c}; \quad P_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ош}}}{N_c},$$

где  $N_{\text{сл}}$  – число допущенных ошибок вида «слияние импульсов»;

$N_{\text{лож}}$  – число допущенных ошибок вида «ложный импульс»;

$N_{\text{др}}$  – число допущенных ошибок вида «дробление импульса»;

$N_{\text{проп}}$  – число допущенных ошибок вида «пропуск импульса»;

$N_{\text{ош}}$  – число ошибочно принятых элементарных символов;

$N_{\text{с}}$  – общее число принятых элементарных символов.

Для сравнительной количественной оценки безопасности функционирования приемников рассматривались два вида ошибок в их работе, вызванных действием помех: защитные и опасные. Защитными являются ошибки в работе приемника, вызывающие уменьшение числа импульсов в сигнале принятой кодовой комбинации на выходе приемника и способные привести к появлению менее разрешающего показания на локомотивном светофоре АЛСН. К защитным относятся ошибки вида «слияние импульсов» и «пропущенный импульс» на выходе приемника, их вероятность определяется выражением

$$P_{\text{заш}} = P_{\text{сл}} + P_{\text{проп.}}$$

Опасными являются ошибки в работе приемника, вызывающие увеличение числа импульсов в сигнале принятой кодовой комбинации на выходе приемника и увеличивающие риск появления более разрешающего показания на локомотивном светофоре АЛСН. К опасным относятся ошибки вида «ложный импульс» и «дробление импульса» на выходе приемника. В качестве показателя безопасности функционирования приемников принята вероятность опасной ошибки  $P_{\text{оп}}$ , определяемая выражением

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{др}} + P_{\text{лож.}}$$

Экспериментальная часть исследования состоит в обработке моделями приемников аддитивных смесей тестовых сигналов и помех (флуктуационной, импульсной, гармонической) при различных отношениях сигнал/помеха на входе блоков РУ (т. н. имитационных прогонах). Поскольку представляет интерес сравнение помехоустойчивости приемников в идентичных условиях (при одинаковых значениях факторов – входных переменных моделей), принято решение использовать в экспериментах концепцию активного планирования. Согласно этой концепции, каждый фактор является управляемым, чтобы можно было устанавливать требуемые его значения. Для обеспечения идентичности

условий функционирования приемников все эксперименты проводились при параллельном подключении их к источникам сигналов и помех.

В качестве источника тестовых сигналов использовалась программа формирования кодового сигнала АЛСН [102]. В качестве тестовых сигналов, подаваемых на входы приемников, использовались сигналы КК « $З_{1,6}$ » и « $КЖ_{1,6}$ ». Выбор этих кодовых комбинаций обусловлен их структурой и видом применяемой в сигнале АЛСН модуляции. Амплитудная манипуляция с «пассивной паузой» характеризуется тем, что в межимпульсном интервале сигнала его энергия равна нулю, в отличие от импульса с ненулевой энергией, а значит, интервал является наименее защищенным от воздействия помех элементом кодового сигнала АЛСН. В сигнале КК « $З_{1,6}$ » суммарная доля длительностей интервалов в кодовом цикле (степень его заполнения интервалами) минимальна, а в КК « $КЖ_{1,6}$ » – максимальна из всех шести кодовых комбинаций. Поэтому их использование в эксперименте позволит получить соответственно максимальную и минимальную оценки помехоустойчивости приемников.

В качестве модели ФП от постоянного тягового тока использовался нормальный белый шум с нулевым математическим ожиданием и варьируемой дисперсией.

В качестве источника ИП использовалась программа для формирования импульсной помехи от постоянного тягового тока электроподвижного состава железных дорог [103].

В экспериментах с флюктуационной и импульсной помехами продолжительность каждого прогона составляла  $10^5$  элементарных символов тестового сигнала, что позволило при протоколировании хода экспериментов фиксировать величины  $P_{ош}$ ,  $P_{сл}$ ,  $P_{лож}$ ,  $P_{др}$  и  $P_{проп}$  с четырьмя значащими цифрами после запятой.

Уменьшение смещения оценок  $P_{ош}$ ,  $P_{сл}$ ,  $P_{лож}$ ,  $P_{др}$  и  $P_{проп}$  в установившемся режиме работы моделей приемников, вызванного воздействием начальных условий, осуществляется с помощью метода, при котором начало сбора статистических данных задерживается до момента завершения переходного

периода. Переходной период для исследуемых приемников сигналов АЛСН обусловлен необходимостью установления ненулевого значения плавающего порога принятия решения на выходе блока БВПП (см. рисунок 3.5), а для квадратурных приемников с ПИП, кроме того, требуется время (около 1,5 с) для расчета порога амплитудного ограничения или бланкирования в блоке БРПАОБ и расчета сигнала с выхода блока БЗ (см. рисунок 3.2) для корректной работы ПИП. Поэтому результаты прогонов в течение первых полутора секунд не учитываются. Соответственно, продолжительность одного прогона увеличивается на эту величину.

В эксперименте с воздействием ФП управляемыми факторами (входными параметрами моделей сигнала и помехи, а также приемников) являются амплитуда сигнала  $U_c$  на входе приемников, коэффициент асимметрии приемного тракта  $K_a$  и дисперсия (мощность) генерируемой ФП  $\sigma_\pi^2$ . В данном эксперименте приняты значения  $U_c = 396$  мВ,  $K_a = 6\%$  (предельно допустимое значение продольной асимметрии рельсовой линии при электротяге постоянного тока) [104]. Такое значение  $U_c$  соответствует работе исследуемых приемников в наиболее неблагоприятных, но допустимых по существующим нормам, условиях.

В эксперименте с воздействием ФП интересно сравнить экспериментальные оценки  $P_{\text{ош}}$  для исследуемых приемников и теоретические оценки  $P_{\text{ош}}$  для оптимальных некогерентного и когерентного линейных приемников АМ-сигналов. Для этого на одном графике необходимо в соответствии с выражениями, приведенными в [105], построить кривые теоретических зависимостей  $P_{\text{ош}}(h_{\text{РУ вх}}^2)$  средней вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха на входе решающего устройства оптимальных некогерентного и когерентного линейных приемников АМ-сигналов, а также кривые экспериментальных аналогичных зависимостей для всех исследуемых приемников, полученных при тех же значениях мощности флуктуационной помехи. При этом на аргумент  $h^2$  накладывается следующее ограничение. Поскольку величина  $P_{\text{ош}}$  фиксируется с четырьмя значащими цифрами после запятой, то и верхнее значение  $h_{\text{max}}^2$  должно удовлетворять условию

$P_{\text{ош}}(h^2_{\text{max}}) \geq 0,0001$ , что равносильно  $h^2_{\text{max}} \leq 34$ . Поэтому для проведения эксперимента выбраны фиксированные значения  $h^2 = 4, 6, 8, \dots, 34$ . Так как в эксперименте амплитуда сигнала неизменна, то варьирование  $h^2$  можно обеспечить путем изменения дисперсии генерируемой флюктуационной помехи  $\sigma_{\Pi}^2$ . Расчет  $\sigma_{\Pi}^2$  осуществлялся в соответствии с методикой, представленной в [27]. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Соответствие расчетных значений дисперсии флюктуационной помехи задаваемым значениям отношения сигнала/помеха

$h_{\text{РУ вх}}^2$	$\sigma_{\Pi}^2, \text{В}^2$
4	14,360
6	10,665
8	8,589
10	7,237
12	6,278
14	5,558
16	4,995
18	4,542
20	4,169
22	3,856
24	3,588
26	3,359
28	3,156
30	2,979
32	2,822
34	2,681

В эксперименте с ИП управляемыми факторами являются амплитуда  $U_c$  сигнала на входе приемников и коэффициент асимметрии приемного тракта  $K_a$ , которыми определяется отношение сигнал/помеха на входе приемников. Значение  $U_c$ , аналогично предыдущему эксперименту, принято равным 396 мВ. Коэффициенту  $K_a$  задавались значения 5, 10, 15, ..., 50%; это обусловлено тем, что на практике его значение может достигать 50% (при движении локомотива в кривой железнодорожного пути, боковой качке его кузова). Чем большее значение

$K_a$ , тем больше амплитуда импульсов помехи и, соответственно, меньше отношение сигнал/помеха.

В качестве тестовых сигналов, подаваемых на входы приемников, по тем же соображениям, что и в предыдущем эксперименте, использовались сигналы КК «З<sub>1,6</sub>» и «КЖ<sub>1,6</sub>».

Важным моментом планирования имитационных экспериментов при воздействии флюктуационных и импульсных помех, представляющих собой случайные процессы, является определение числа повторных прогонов моделей (при неизменных значениях всех факторов), необходимых для обеспечения точности и достоверности результатов моделирования. Оценки значений  $P_{\text{ош}}$ ,  $P_{\text{сл}}$ ,  $P_{\text{лож.}}$ ,  $P_{\text{др}}$  и  $P_{\text{проп}}$  вычисляются как выборочные средние значения по некоторому количеству прогонов. Выбор числа повторных прогонов производился с помощью доверительных интервалов аналогично методике, приведенной в [27]. По результатам выполнения предварительных прогонов при воздействии флюктуационных и импульсных помех и последующих расчетов определено, что для достижения требуемой точности оценок  $P_{\text{ош}}$ ,  $P_{\text{сл}}$ ,  $P_{\text{лож.}}$ ,  $P_{\text{др}}$  и  $P_{\text{проп}}$  (четыре значащие цифры после запятой) число повторных прогонов моделей должно быть не менее пяти. Соответственно, принято решение выполнять по пять повторных прогонов.

### 3.3.3 Методика проведения эксперимента при воздействии гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП

Суть эксперимента заключалась в подаче на вход имитационных моделей всех приемников одной и той же аддитивной смеси тестового сигнала и ГП от высоковольтной ЛЭП и определении для каждого приемника длительности временного интервала  $T_{\text{ош}}$ , в течение которого наблюдались ошибки в приеме.

В качестве тестового сигнала, подаваемого на входы приемников, в данном эксперименте использовалось гармоническое колебание с частотой 50 Гц,

манипулированное последовательностью прямоугольных импульсов со скважностью 2 и периодом колебания 0,24 с. Длительности элементов такого сигнала равны длительности самого короткого элемента (межимпульсного интервала) по всем кодовым сигналам АЛСН (см. рисунок 1.6). Это позволило оценивать  $T_{\text{ош}}$  для всех исследуемых приемников с погрешностью, не превышающей длительность одного элемента тестового сигнала (0,12 с).

В качестве источника ГП от высоковольтной ЛЭП, имеющей прямую и косвенную составляющие, использовалась совокупность программы формирования помехи прямого влияния ЛЭП [94] и программы формирования помехи косвенного влияния ЛЭП [93]. Настройки модели ГП соответствовали следующим значениям параметров высоковольтной ЛЭП 750 кВ с горизонтальным расположением проводов:

- расстояние между проекциями на горизонтальную плоскость фазных проводов ЛЭП равно 20 м;
- высота подвеса фазных проводов ЛЭП над горизонтальной плоскостью равна 15 м;
- амплитудное значение тока в проводах ЛЭП равно 3000 А.

В качестве показателя помехоустойчивости приемников в данном эксперименте используется длительность временного интервала  $T_{\text{ош}}$ , в течение которого наблюдались ошибки в приеме (рисунок 3.10). Такой выбор показателя обусловлен характером воздействия ГП от ЛЭП и алгоритмом дешифрации кодовых комбинаций АЛСН. ГП от ЛЭП воздействует на принимаемый сигнал АЛСН при нахождении локомотива в зоне влияния ЛЭП. Протяженность этой зоны зависит от конструкции ЛЭП, угла ее пересечения с железнодорожной линией, силы тока в проводах ЛЭП и др. факторов. Время нахождения локомотива в зоне влияния ЛЭП обратно пропорционально скорости поезда. Согласно алгоритму дешифрации кодовых сигналов АЛСН в КЛУБ-У смена огней на локомотивном индикаторе осуществляется с задержкой времени [106], необходимой для накопления трех кодовых комбинаций. Соответственно, если величина  $T_{\text{ош}}$  не

превысит этого значения, то появления ложного показания на локомотивном светофоре (сбоя в работе АЛСН) в отсутствие других негативных факторов не будет; в случае же превышения задержки – произойдет сбой. Таким образом, величина  $T_{\text{ош}}$  характеризует способность приемников осуществлять достоверный прием в условиях воздействия ГП от ЛЭП и может использоваться в качестве показателя их помехоустойчивости. Чем меньше значение  $T_{\text{ош}}$ , тем выше помехоустойчивость приемника.

Значения  $T_{\text{ош}}$  в эксперименте измерялись по осциллограммам сигналов на выходе приемников. На рисунке 3.10 для наглядной демонстрации способа определения  $T_{\text{ош}}$  представлены осциллограммы сигналов, полученных для квадратурного приемника без ПИП и ПГП при  $v_{\text{п}} = 20 \text{ м/с}$  и  $\phi_{\text{л}} = 75^\circ$ . На осциллограммах по горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной – напряжение сигнала в вольтах.

Выходной сигнал приемника (нижняя осциллограмма на рисунке 3.10) формируется входящим в его состав пороговым РУ, осуществляющим сравнение выделяемой на выходе квадратурного коррелятора огибающей принимаемого тестового сигнала (кривая 1 на верхней осциллограмме) с плавающим порогом принятия решения (кривая 2 на верхней осциллограмме). Отсчет начала временного интервала  $T_{\text{ош}}$  начинается в момент возникновения первой ошибки в приеме элементарной посылки тестового сигнала (соответствует моменту времени 19,2 с на графиках), а заканчивается в момент восстановления правильного приема элементарной посылки (соответствует моменту времени 23,4 с на графиках). Таким образом, значение  $T_{\text{ош}}$  на рисунке 3.10 составит около 4,2 с.

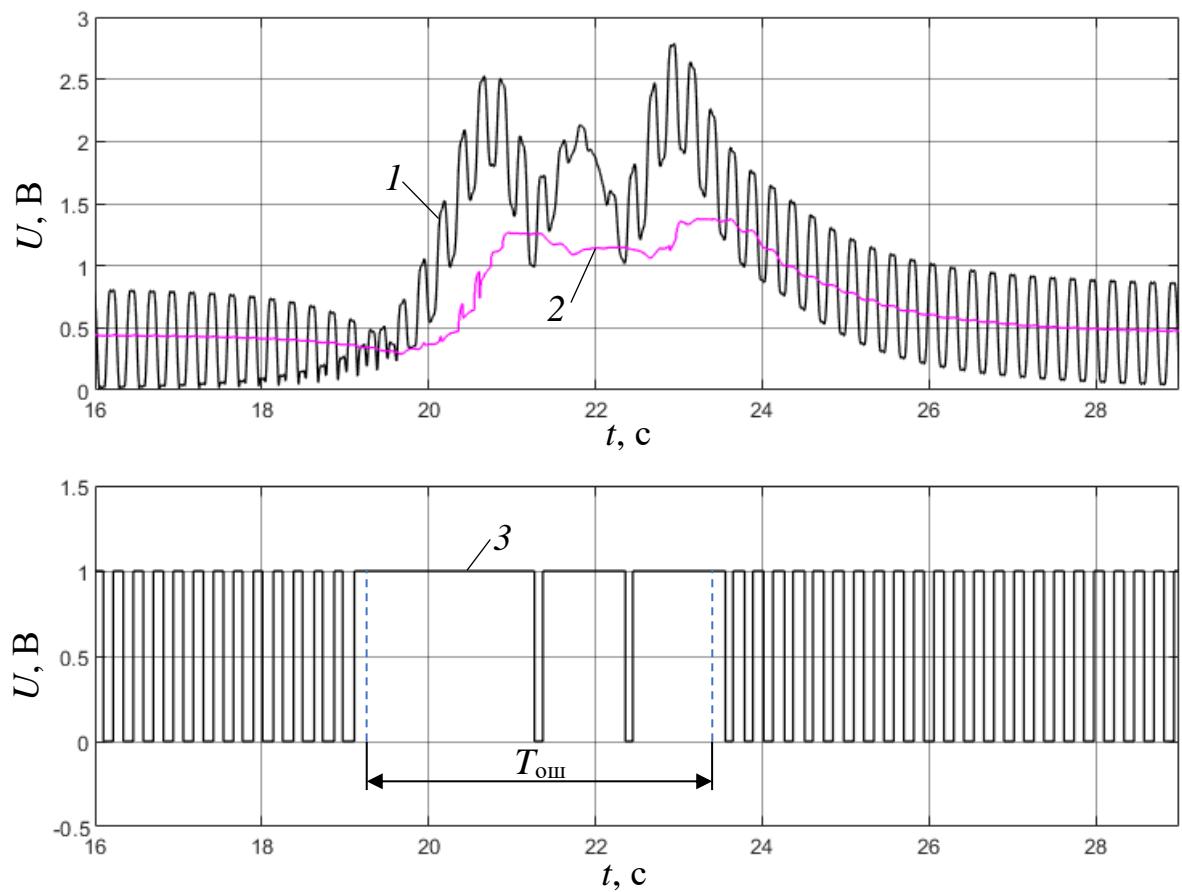


Рисунок 3.10 – Осциллограммы, поясняющие способ определения  $T_{\text{osh}}$ :  
 1 – огибающая принимаемого тестового сигнала; 2 – плавающий порог принятия решения; 3 – выходной сигнал приемника

В эксперименте с ГП от ЛЭП управляемыми факторами являются амплитуда  $U_c$  сигнала на входе приемников, коэффициент асимметрии приемного тракта  $K_a$ , скорость  $v_p$  поезда в зоне влияния ЛЭП и угол фл пересечения оси ЛЭП с железнодорожной линией.

Значение  $U_c$  в эксперименте задавалось исходя из допущения, что ЛЭП пересекает железнодорожную линию в середине, а не в конце РЛ, поэтому кодовый ток в рельсах, а следовательно, и напряжение  $U_c$  на входе приемников будет больше, чем ток (напряжение) в конце РЛ. Это обусловлено тем, что для уменьшения влияния ЛЭП на устройства АЛС на участках с электротягой постоянного тока или с автономной тягой (при частоте тока АЛС 50 Гц) перегонные РЦ на однопутных участках размещают так, чтобы пересечение пути и ЛЭП было

примерно на середине РЦ, а на двухпутных (многопутных) участках, чтобы пересечение находилось ближе к передающим концам рельсовых цепей [76].

Задаваемое значение  $U_c$  на входе приемников было определено следующим образом. Согласно графикам, представленным на рисунке 1.9, при нормативном значении  $r_i = 1 \text{ Ом} \cdot \text{км}$  кодовый ток в середине РЛ длиной 1 км больше этого же тока в начале РЛ в 1,67 раза, а для РЛ длиной 2,6 км – в 2,66 раза. С учетом этого в эксперименте значение  $U_c$  было увеличено в 2 раза в сравнении со значением, использованным в предыдущих экспериментах, до 792 мВ.

В данном эксперименте значение  $K_a$  было принято равным 40 %, что соответствует математическому ожиданию коэффициента асимметрии при движении локомотива [107]. Такое большое значение обусловлено тем, что оно включает в себя не только и не столько продольную асимметрию рельсовой линии (нормируемую на уровне 4% при электротяге переменного тока и 6% при электротяге постоянного тока), сколько асимметрию индуктивной линии, значение которой определяется в статике асимметрией электрических параметров приемных катушек и асимметрией их подвеса на кузове локомотива относительно осей рельсов, а в динамике – неодинаковым смещением левой и правой катушек относительно осей рельсов в вертикальной и горизонтальной плоскостях при движении в кривой, при боковой качке и галопировании кузова локомотива.

Поскольку  $T_{\text{опш}}$  зависит как от скорости  $v_p$ , так и от угла  $\phi_l$ , то необходима независимая оценка влияния каждого из этих факторов. Для этого эксперимент был разбит на серию прогонов моделей приемников со всеми возможными сочетаниями значений  $v_p$  и  $\phi_l$ . Для ограничения количества прогонов выбраны следующие дискретные значения аргументов:  $v_p = 5; 10; \dots; 35 \text{ м/с}$  и  $\phi_l = 90^\circ; 85^\circ; \dots; 40^\circ$ . Максимальное значение  $v_p$  выбрано исходя из того, что, как было указано в п. 2.2.3, максимально допустимая скорость, при которой возможно использование системы АЛСН – 140 км/ч.

Приведенные в п. 3.3.2 сведения являются достаточными, чтобы можно было приступить к экспериментальной оценке помехоустойчивости и безопасности функционирования исследуемых приемников сигналов АЛСН, будучи уверенным

в объективной значимости всех полученных экспериментальных данных и сделанных на их основе выводов.

### **3.3.4 Помехоустойчивость и безопасность функционирования приемников в условиях воздействия аддитивной флюктуационной помехи**

Полученные в результате эксперимента с ФП значения  $P_{\text{ош}}$ ,  $P_{\text{сл}}$ ,  $P_{\text{лож.}}$ ,  $P_{\text{др}}$  и  $P_{\text{проп}}$  при различных значениях  $h^2$  представлены в таблицах П3.1-П3.5 Приложения 3.

На рисунках 3.11 и 3.12 представлены графики полученных экспериментально зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(h^2)$  для исследуемых приемников при воздействии флюктуационной помехи и прогонах моделей с использованием сигнала КК «З<sub>1,6</sub>» и «КЖ<sub>1,6</sub>» соответственно. Также пунктирными линиями показаны графики теоретических зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(h^2)$  для когерентного и некогерентного приемников АМ-сигналов.

Представленные на рисунке 3.11 графики показывают, что во всем диапазоне значений  $h^2$  помехоустойчивость КП при приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>» выше помехоустойчивости АДВУ. Т. о. квадратурное детектирование позволяет увеличить помехоустойчивость приемника, приблизив ее к помехоустойчивости оптимального когерентного приемника. Из квадратурных приемников наибольшей помехоустойчивостью обладает КПИП. Добавление в КП подавителя гармонических помех (приемник КПГП) при  $h^2 < 16$  практически не влияет на его помехоустойчивость, а при  $h^2 > 16$  приводит к ее снижению почти до уровня помехоустойчивости АДВУ.

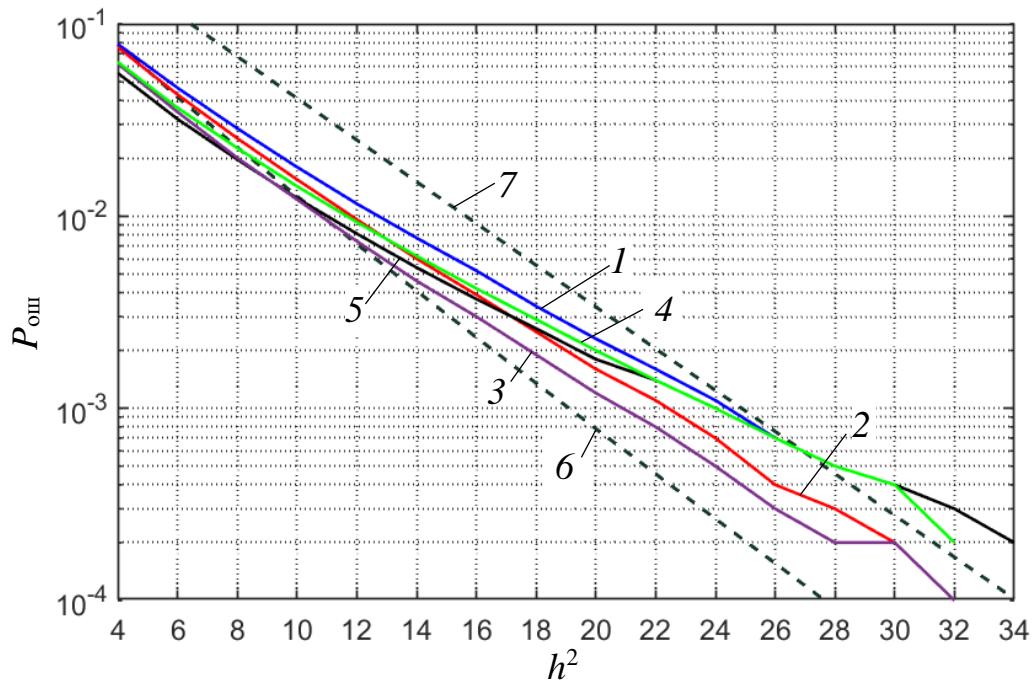


Рисунок 3.11 – Графики экспериментальных зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(h^2)$  при воздействии флуктуационной помехи и приеме сигнала КК « $З_{1,6}$ » для АДВУ (1), КП (2), КПИП (3), КПГП (4), КПИГП (5); графики теоретических зависимостей для когерентного (6) и некогерентного (7) приемника АМ-сигналов

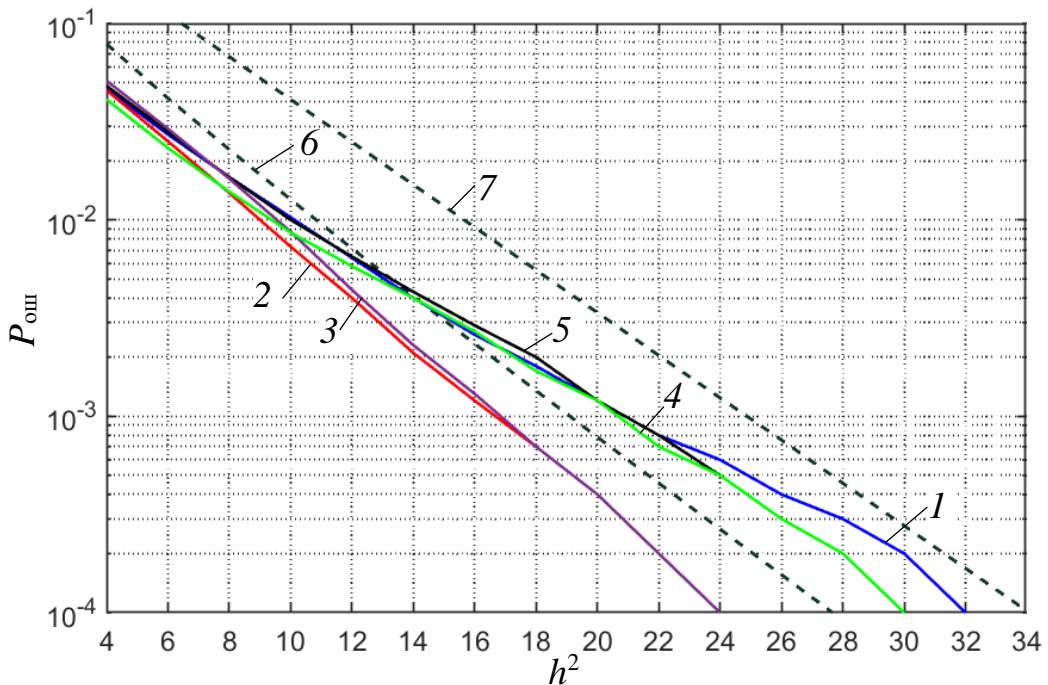


Рисунок 3.12 – Графики экспериментальных зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(h^2)$  при воздействии флуктуационной помехи и приеме сигнала КК « $КЖ_{1,6}$ » для АДВУ (1), КП (2), КПИП (3), КПГП (4), КПИГП (5); графики теоретических зависимостей для когерентного (6) и некогерентного (7) приемника АМ-сигналов

Из графиков на рисунке 3.12 следует, что при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» КПГП и КПИГП в диапазоне значений  $h^2 < 22$  характеризуются помехоустойчивостью, сопоставимой с помехоустойчивостью АДВУ, а при  $h^2 > 22$  АДВУ обладает наихудшей помехоустойчивостью. Помехоустойчивость КП и КПИП существенно отличается от помехоустойчивости остальных приемников в большую сторону.

Графики также показывают, что в диапазоне значений  $h^2 = 4 \dots 12$  помехоустойчивость всех приемников оказалась выше помехоустойчивости оптимального линейного когерентного приемника. Это объясняется тем, что во всех приемниках в составе РУ имеется блок защиты от «дребезга» БЗД, осуществляющий временную селекцию импульсов и интервалов, поступающих с выхода ПЭ. Анализ осцилограмм сигналов на выходах блоков ПЭ и БЗД показал, что БЗД «отсеивает» значительную долю кратковременных ложных импульсов и интервалов, повышая тем самым помехоустойчивость приемников.

Сравнение графиков на рисунках 3.11 и 3.12 показывает, что при воздействии ФП для всех исследованных приемников средняя вероятность ошибки при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» меньше, чем при приеме КК «З<sub>1,6</sub>». Анализ статистики ошибок по их видам, а также осцилограмм сигналов на выходах блоков ПЭ и БЗД показывает, что при приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>» более высокое значение  $P_{\text{ош}}$  вызвано существенно (на порядок и более) большим количеством ошибок вида «слияние импульсов» в результате заполнения помехой коротких межимпульсных интервалов сигнала. В сигнале КК «КЖ<sub>1,6</sub>» коротких интервалов нет и, соответственно, число таких ошибок незначительно.

В таблице 3.4 приведены значения выигрыша  $B_{\text{п фп}}$  в помехоустойчивости квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии ФП (выигрыш определяется как отношение  $P_{\text{ош}}$  для АДВУ к  $P_{\text{ош}}$  для квадратурного приемника). Диапазон значений  $B_{\text{п}}$  (минимальное и максимальное значения) определен для принятого диапазона значений  $h^2$ . Также указано среднее значение выигрыша. Из таблицы видно, что наиболее предпочтительным по критерию максимального выигрыша в помехоустойчивости при приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>» является КПИП, а

при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» – КП. Также видно, что основной выигрыш в помехоустойчивости при воздействии ФП обеспечивается за счет квадратурного детектирования. С учетом различия структур сигналов КК «З<sub>1,6</sub>» и «КЖ<sub>1,6</sub>» можно сделать вывод, что квадратурное детектирование обеспечивает существенный прирост устойчивости к воздействию ФП именно в пассивных паузах сигналов АЛСН. ПИП не оказывает значимого влияния на помехоустойчивость, а применение ПГП приводит к потере значительной доли выигрыша от применения квадратурного детектирования.

Таблица 3.4 – Выигрыш в помехоустойчивости квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии флюктуационной помехи

Сигнал	Выигрыш $B_{\text{п фп}}$			
	КП	КПИП	КПГП	КПИГП
«З <sub>1,6</sub> »	1,04-3,00 средний 1,53	1,27-3,00 средний 1,89	1,10-1,50 средний 1,18	1,14-1,45 средний 1,24
«КЖ <sub>1,6</sub> »	1,01-6,00 средний 2,54	0,90-6,00 средний 2,45	0,96-2,00 средний 1,2	0,90-2,00 средний 1,11

По полученным экспериментальным данным также была выполнена оценка безопасности функционирования исследуемых приемников при воздействии ФП.

Поскольку в соответствии с алгоритмом функционирования АЛСН увеличение числа импульсов в КК «З» не приводит к снижению уровня безопасности движения, безопасность функционирования приемников оценивалась только при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>».

На рисунке 3.13 представлены графики зависимостей  $P_{\text{оп}} = f(h^2)$  для исследуемых приемников при прогонах моделей с использованием сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>».

Графики на рисунке 3.13 показывают, что наименее безопасным из всех исследованных приемников при  $h^2 > 10$  (что имеет место на практике) является АДВУ. Применение в приемнике АЛСН квадратурного детектирования

положительно сказывается на безопасности его функционирования. Добавление в КП блоков ПИП и ПГП приводит к дополнительному увеличению безопасности их функционирования.

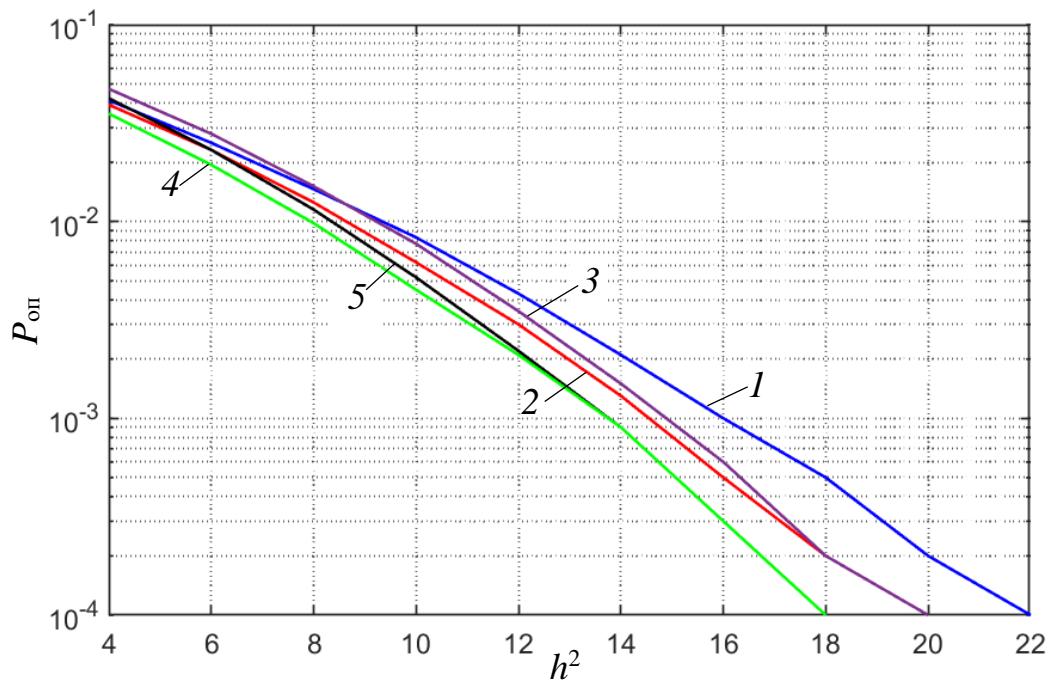


Рисунок 3.13 – Графики экспериментальных зависимостей  $P_{\text{оп}} = f(h^2)$  при воздействии флюктуационной помехи и приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» для АДВУ (1), КП (2), КПИП (3), КПГП (4) и КПИГП (5)

В таблице 3.5 приведены значения выигрыша  $B_{6\text{ фп}}$  в безопасности функционирования исследуемых квадратурных приемников по сравнению с АДВУ ( $B_{6\text{ фп}}$  определяется как отношение  $P_{\text{оп}}$  для АДВУ к  $P_{\text{оп}}$  для квадратурных приемников). Диапазон значений  $B_{6\text{ фп}}$  (минимальное и максимальное значения) определен для принятого диапазона значений  $h^2$ . Также указано среднее значение  $B_{6\text{ фп}}$ . Согласно данным таблицы 3.5, наиболее предпочтительным по критерию максимального выигрыша в безопасности функционирования является КПГП, незначительно хуже – КПИГП.

Таблица 3.5 – Выигрыш в безопасности функционирования квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии флюктуационной помехи

Сигнал	Выигрыш $B_{\text{б фп}}$			
	КП	КПИП	КПГП	КПИГП
«КЖ <sub>1,6</sub> »	1,05–2,48 средний 1,58	0,87–1,97 средний 1,40	1,17–4,91 средний 2,31	0,98–4,91 средний 2,19

### 3.3.5 Помехоустойчивость и безопасность функционирования приемников в условиях воздействия аддитивной импульсной помехи

Полученные в результате эксперимента с ИП значения  $P_{\text{ош}}$ ,  $P_{\text{сл}}$ ,  $P_{\text{лож.}}$ ,  $P_{\text{др}}$  и  $P_{\text{проп}}$  при различных значениях  $K_a$  представлены в таблицах П4.1-П4.5 Приложения 4.

На рисунках 3.14 и 3.15 представлены графики полученных экспериментально зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(K_a)$  для исследуемых приемников при воздействии ИП и прогонах моделей с использованием сигналов КК «З<sub>1,6</sub>» и «КЖ<sub>1,6</sub>» соответственно.

Представленные на рисунке 3.14 графики показывают, что в данном эксперименте наименьшую помехоустойчивость демонстрирует АДВУ. Применение квадратурного детектирования, а также подавителя гармонических помех позволяет повысить помехоустойчивость, но наибольший эффект достигается при применении подавителя импульсных помех.

Графики на рисунке 3.15 демонстрируют в целом схожую картину. Отличия в том, что при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» применение ПГП практически не оказывает влияния на помехоустойчивость приемников, а при значениях коэффициента асимметрии приемного тракта менее 20 % КД не имеет преимущества в помехоустойчивости перед АДВУ.

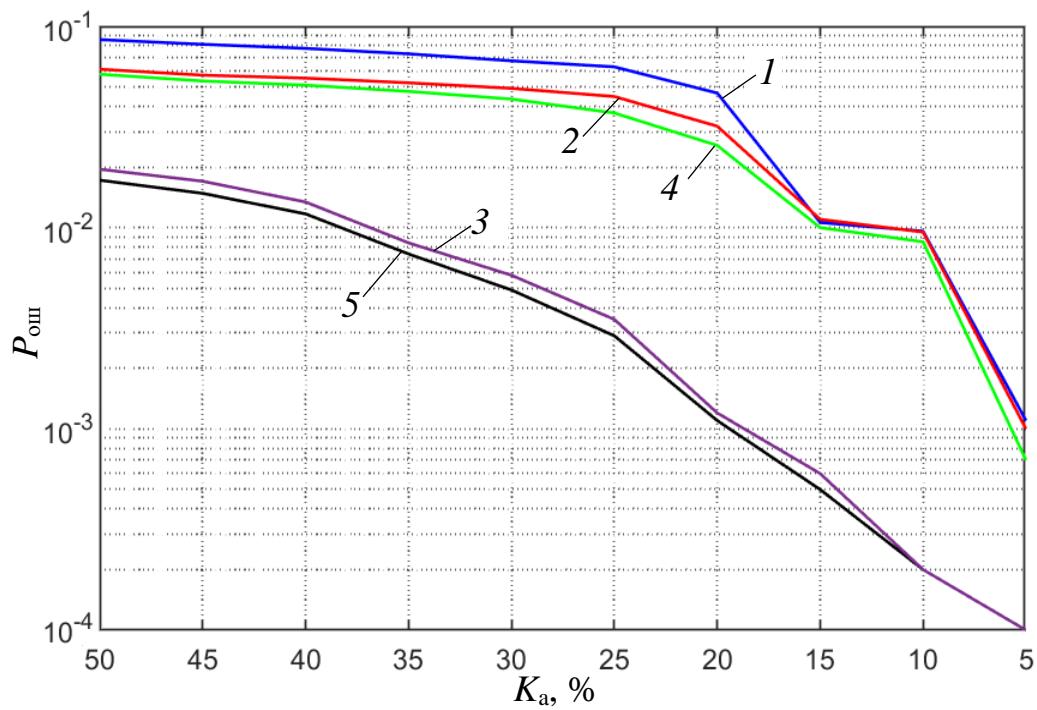


Рисунок 3.14 – Графики экспериментальных зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(K_a)$  при воздействии импульсной помехи и приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>» для АДВУ (1), КП (2), КПИП (3), КПГП (4), КПИГП (5)

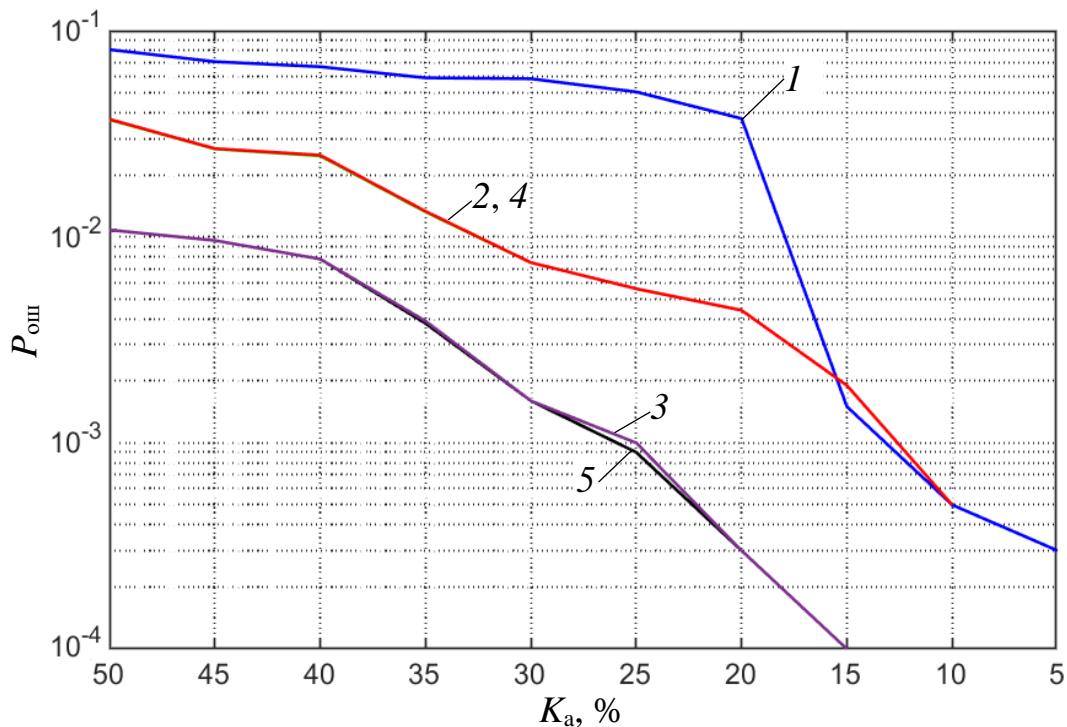


Рисунок 3.15 – Графики экспериментальных зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(K_a)$  при воздействии импульсной помехи и приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» для АДВУ (1), КП (2), КПИП (3), КПГП (4), КПИГП (5)

В таблице 3.6 представлены значения выигрыша в помехоустойчивости  $B_{\text{п ип}}$  квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии ИП. Также указано среднее значение  $B_{\text{п ип}}$ . Данные таблицы показывают, что при приеме обоих сигналов наиболее предпочтительным по критерию максимального выигрыша в помехоустойчивости является КПИГП.

Таблица 3.6 – Выигрыш в помехоустойчивости квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии импульсной помехи

Сигнал	Выигрыш $B_{\text{п ип}}$			
	КП	КПИП	КПГП	КПИГП
«З <sub>1,6</sub> »	0,96-1,46 средний 1,28	4,41-48,00 средний 18,27	1,06-1,82 средний 1,49	4,99-48,00 средний 20,01
«КЖ <sub>1,6</sub> »	0,79-9,02 средний 4,62	5,00-125,00 средний 32,90	0,79-9,02 средний 4,61	5,00-125,00 средний 33,65

По результатам данного эксперимента была выполнена оценка безопасности функционирования квадратурных приемников при воздействии ИП и приеме сигнала «КЖ<sub>1,6</sub>». На рисунке 3.16 представлены графики полученных зависимостей  $P_{\text{оп}} = f(K_a)$ .

Представленные на рисунке 3.16 графики показывают, что при  $K_a > 15\%$  АДВУ является наименее безопасным из исследованных приемников, а при  $K_a = 10-15\%$  безопасность его функционирования сопоставима с безопасностью КП и КПГП. Наиболее безопасными при  $K_a \leq 35\%$  являются КПИП и КПИГП, а при  $K_a \geq 40\%$  – КП и КПГП.

Таким образом, применение квадратурного детектирования в условиях воздействия ИП при  $K_a > 15\%$  дает увеличение безопасности функционирования приемника АЛСН. Добавление в КП подавителя импульсных помех приводит к значительному повышению безопасности его функционирования, а добавление подавителя гармонических помех практически не влияет на безопасность функционирования квадратурного приемника.

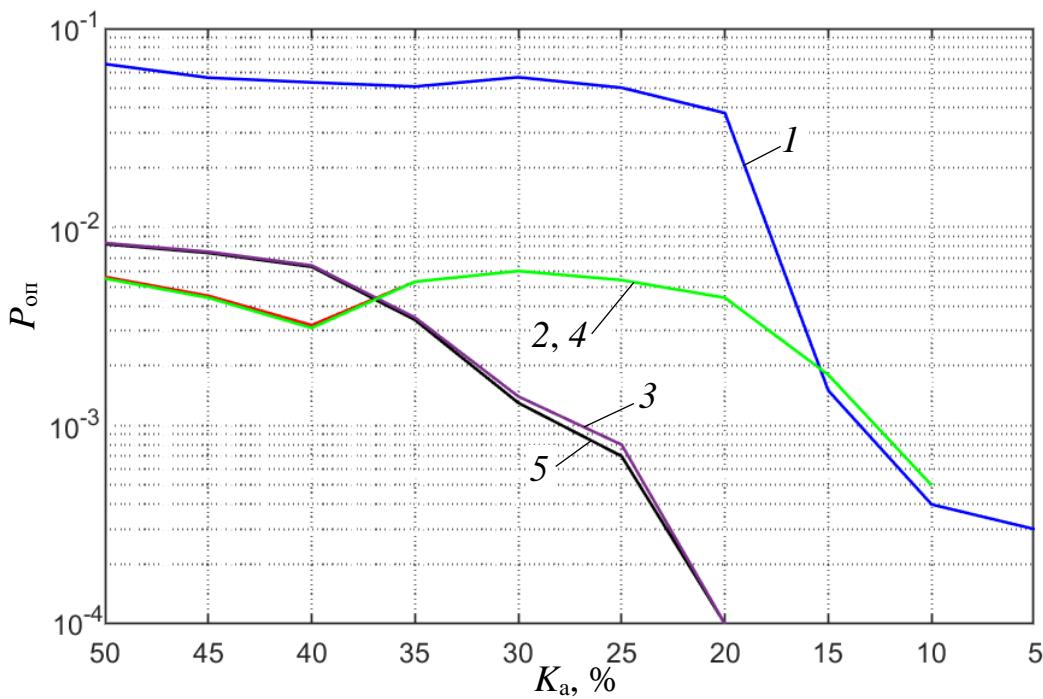


Рисунок 3.16 – Графики экспериментальных зависимостей  $P_{\text{оп}} = f(K_a)$  при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>» для АДВУ (1), КП (2), КПИП (3), КПГП (4), КПИГП (5)

В таблице 3.7 представлены значения выигрыша в безопасности функционирования квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии ИП. Также указано среднее значение  $B_{\text{б ип}}$ .

Таблица 3.7 – Выигрыш в безопасности функционирования квадратурных приемников по сравнению с АДВУ при воздействии импульсной помехи

Сигнал	Выигрыш $B_{\text{б ип}}$			
	КП	КПИП	КПГП	КПИГП
«КЖ <sub>1,6</sub> »	0,83-16,72 средний 8,48	7,53-375,00 средний 84,82	0,83-17,26 средний 8,58	7,64-375,00 средний 86,95

По данным таблицы 3.7 можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным по критерию максимальной безопасности функционирования является квадратурный приемник с подавителем импульсных помех и подавителем гармонических помех.

### 3.3.6 Исследование помехоустойчивости квадратурных приемников в условиях воздействия гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП

Полученные в результате эксперимента значения  $T_{\text{опш}}$  при сочетаниях различных значений  $v_{\text{п}}$  и  $\text{фл}$  представлены в таблице П5.1 Приложения 5. В ней зеленым цветом выделены ячейки, в которых значение  $T_{\text{опш}}$  не превышает длительности трех КК с более коротким по длительности циклом 1,6 с, т.е.  $T_{\text{опш}} < 4,8$  с. При таких значениях  $T_{\text{опш}}$  при движении поезда в зоне влияния ЛЭП и приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>», «Ж<sub>1,6</sub>» или «КЖ<sub>1,6</sub>» сбоя в работе АЛСН не будет. Желтым цветом выделены ячейки, в которых  $4,8 \text{ с} < T_{\text{опш}} < 5,58 \text{ с}$ , где 5,58 с – суммарная длительность сигнала трех КК с длительностью 1,86 с каждая. При таких значениях  $T_{\text{опш}}$  при движении поезда в зоне влияния ЛЭП и приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>», «Ж<sub>1,6</sub>» или «КЖ<sub>1,6</sub>» произойдет сбой в работе АЛСН, но не будет сбоя при приеме сигнала КК «З<sub>1,86</sub>», «Ж<sub>1,86</sub>» или «КЖ<sub>1,86</sub>». Красным цветом выделены ячейки, в которых  $T_{\text{опш}} > 5,58$  с. При таких значениях  $T_{\text{опш}}$  при движении поезда в зоне влияния ЛЭП и приеме любого сигнала произойдет сбой в работе АЛСН.

Как показывает цветовое выделение ячеек в таблице П5.1 Приложения 5, наибольшей помехоустойчивостью при воздействии ГП от ЛЭП обладают приемники КПГП и КПИГП, а наименьшей – КП и КПИП. Таким образом, применение квадратурного детектирования и подавителя импульсных помех приводит к снижению помехоустойчивости локомотивного приемника сигналов АЛСН, а дополнительное применение подавителя гармонических помех позволяет не только нивелировать это снижение, но и обеспечивает увеличение помехоустойчивости в сравнении с АДВУ.

В таблице 3.8 представлены определенные по таблице П5.1 Приложения 5 при различных значениях  $\text{фл}$  значения минимальной скорости поезда  $v_{\text{п min}}$  для каждого из исследуемых приемников, при движении с которыми в зоне влияния ЛЭП не будет происходить сбоя в работе АЛСН. Зеленым цветом в таблице выделены ячейки с наилучшими (наименьшими) значениями  $v_{\text{п min}}$ , оранжевым – с наихудшими (наибольшими).

Таблица 3.8 – Значения минимальной скорости поезда в зоне влияния ЛЭП, при которой сбой в работе АЛСН происходить не будет

фл, °	$v_{\text{п min}}$ , м/с (меньше - лучше)				
	АДВУ	КП	КПИП	КПГП	КПИГП
90	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
85	10,0	12,5	12,5	10,0	10,0
80	12,5	17,5	17,5	12,5	12,5
75	20,0	17,5	17,5	15,0	15,0
70	22,5	20,0	20,0	17,5	17,5
65	25,0	22,5	22,5	17,5	17,5
60	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
55	30,0	32,5	32,5	27,5	27,5
50	32,5	35,0	35,0	30,0	30,0
45	35,0	>35,0	>35,0	32,5	35,0
40	>35,0	>35,0	>35,0	>35,0	>35,0

Данные в таблице 3.8 показывают, что при перпендикулярном пересечении ЛЭП и железнодорожной линии ( $\phi_{\text{л}} = 90^{\circ}$ ) воздействие ГП от ЛЭП на приемники минимально, что позволяет поезду двигаться с меньшей скоростью без риска возникновения сбоя в работе АЛСН.

Согласно таблице 3.8, наилучшим (с наибольшей помехоустойчивостью при воздействии гармонической помехи от ЛЭП) приемником является КПГП, незначительно хуже КПИГП, а наихудшими являются КП и КПИП.

### 3.4 Выбор квадратурного приемника сигналов АЛСН

Полученные в п. 3.3.4 – 3.3.6 оценки помехоустойчивости и безопасности функционирования квадратурных приемников показали неоднозначную картину эффективности применения квадратурного амплитудного детектирования, ПИП и ПГП при подавлении ФП, ИП и ГП от высоковольтной ЛЭП. Поэтому возникает необходимость выработки критерия, позволившего бы осуществить однозначный выбор одного из исследованных приемников с целью его дальнейшей технической реализации в виде экспериментального образца. В качестве такого критерия предлагается универсальность применения приемника в различных условиях

эксплуатации. Под универсальностью в данном случае понимается возможность его применения при воздействии помех всех видов без значительной потери в показателях помехоустойчивости и безопасности функционирования в сравнении с наилучшими значениями соответствующих показателей для всех исследованных приемников.

На рисунке 3.17 представлена диаграмма, отображающая значения выигрышей в помехоустойчивости  $B_{\pi}$  и безопасности функционирования  $B_b$ , полученные для предлагаемых приемников в условиях воздействия ФП и ИП. Зелёным цветом показан диапазон значений  $B_{\pi}$  при приеме сигнала КК «З<sub>1,6</sub>», а красным – при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>». Синим цветом показан диапазон значений  $B_b$  при приеме сигнала КК «КЖ<sub>1,6</sub>». Пунктирной линией в столбцах показано среднее значение  $B_{\pi}$  и  $B_b$ .

Рисунок 3.17 показывает, что при воздействии ФП все предлагаемые приемники показывают сопоставимый выигрыш в помехоустойчивости, при этом КПГП и КПИГП демонстрируют больший выигрыш в безопасности функционирования в сравнении с КП и КПИП. При воздействии ИП наибольшим выигрышем как в помехоустойчивости, так и в безопасности функционирования характеризуются КПИП и КПИГП, что объясняется высокой эффективностью имеющегося в составе данных приемников ПИП.

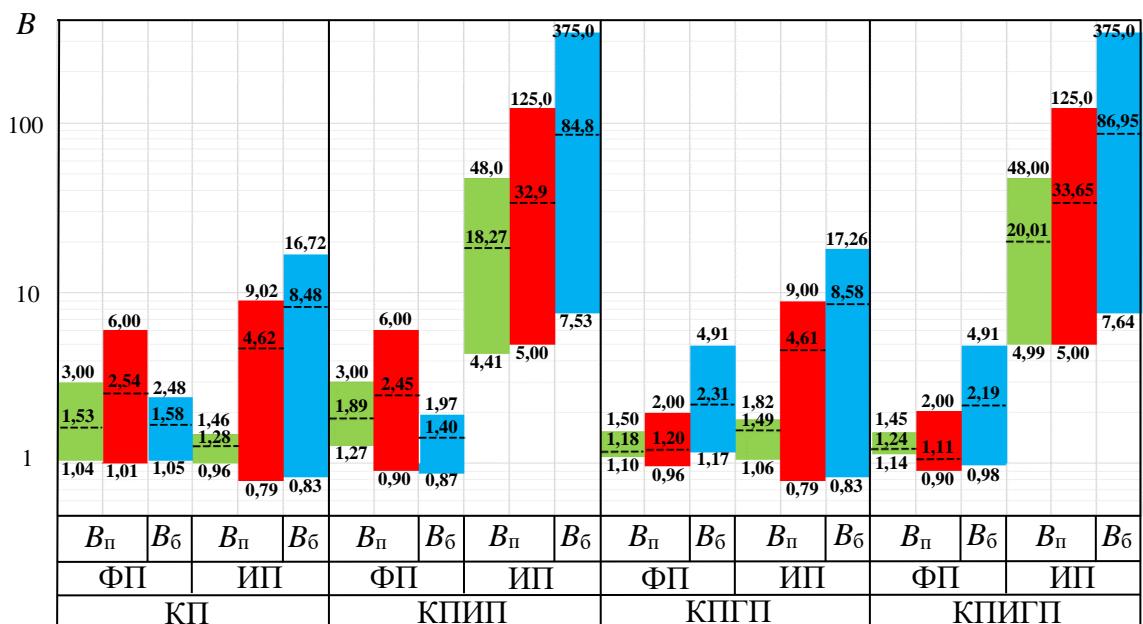


Рисунок 3.17 – Диаграмма выигрышей в помехоустойчивости и безопасности функционирования квадратурных приемников в сравнении с АДВУ

Для обоснованного выбора между КПИП и КПИГП необходимо учесть их эффективность в борьбе с ГП от ЛЭП (см. п. 3.3.6). Результаты эксперимента, представленные в таблице 3.8, показывают, что большей помехоустойчивостью при воздействии ГП от ЛЭП обладает КПИГП.

Таким образом, по принятому критерию универсальности применения приемника (при воздействии помех всех видов без значительной потери в показателях помехоустойчивости и безопасности функционирования) для технической реализации экспериментального образца наиболее целесообразным решением, позволяющим эффективно бороться как с импульсными помехами, так и с гармоническими помехами от ЛЭП, является КПИГП.

### **3.5 Выводы по третьей главе**

1. Разработанные имитационные модели квадратурных приемников сигналов АЛСН воспроизводят алгоритмы их функционирования при применении квадратурного амплитудного детектора и блоков нелинейного преобразования в виде подавителя импульсных помех и подавителя гармонических помех. Модели позволяют исследовать процесс функционирования приемников при различных условиях (в том числе номинальных) и оценить их помехоустойчивость и безопасность функционирования при воздействии помех любого вида.

2. При отклонении частоты несущей принимаемого сигнала от ее номинального значения в пределах допустимых значений коэффициент передачи квадратурного детектора изменяется не более чем на 0,35 %, а при отклонениях, превышающих допустимые в два раза – не более чем на 1,21 %. При наличии на входе сигнала с номинальным напряжением устойчивое функционирование квадратурных приемников в отсутствие помех обеспечивается при разности частот несущего и опорных колебаний 9 Гц (при частотах несущей 25, 50 и 75 Гц). Таким образом, нестабильность частоты несущей сигнала АЛСН в условиях эксплуатации не будет оказывать значимого влияния на устойчивость функционирования квадратурных приемников.

3. При воздействии флуктуационной помехи (нормального белого шума) применение квадратурного детектирования в сравнении с детектированием на основе скользящего окна обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости в среднем в 1,53-2,54 раза, в безопасности функционирования при приеме сигнала «КЖ<sub>1,6</sub>» – в 1,58 раза. Применение подавителя импульсных помех и подавителя гармонических помех приводит к уменьшению выигрыша в помехоустойчивости в среднем до 1,11-1,24 раза, при этом выигрыш в безопасности функционирования увеличивается до 2,19 раза.

4. При воздействии импульсной помехи от постоянного тягового тока применение квадратурного детектирования в сравнении с детектированием на основе скользящего окна обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости в среднем в 1,28-4,62 раза, в безопасности функционирования при приеме сигнала «КЖ<sub>1,6</sub>» – в 8,48 раза. Применение подавителя импульсных помех и подавителя гармонических помех приводит к увеличению выигрыша в помехоустойчивости в среднем до 20,01-33,65 раза, при этом выигрыш в безопасности функционирования увеличивается до 86,95 раза.

5. При воздействии гармонической помехи от ЛЭП применение квадратурного детектирования и подавителя импульсных помех приводит к снижению помехоустойчивости приемника сигналов АЛСН в сравнении с приемником с амплитудным детектированием на основе скользящего окна. Применение дополнительно подавителя гармонических помех позволяет не только нивелировать это снижение, но и обеспечивает увеличение помехоустойчивости квадратурного приемника в сравнении с приемником с амплитудным детектированием на основе скользящего окна. Это выражается в уменьшении на 2,5-7,5 км/ч минимальной скорости движения поезда в зоне влияния ЛЭП с углом пересечения 75-50°, при которой сбой в работе АЛСН происходить не будет. При угле пересечения 80-90° квадратурный приемник с подавителем импульсных помех и подавителем гармонических помех характеризуется помехоустойчивостью, сопоставимой с помехоустойчивостью приемника с амплитудным детектированием на основе скользящего окна.

6. По принятому критерию универсальности применения приемника (при воздействии помех всех видов без значительной потери в показателях помехоустойчивости и безопасности функционирования) для технической реализации экспериментального образца наиболее целесообразным решением, позволяющим эффективно бороться как с импульсными помехами, так и с гармоническими помехами от ЛЭП, выбран КПИГП.

## 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КВАДРАТУРНОГО ПРИЕМНИКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПОДАВИТЕЛЯМИ ПОМЕХ

### 4.1 Техническая реализация экспериментального образца приемника

В соответствии с поставленными в работе задачами необходимо выполнить техническую реализацию экспериментального образца квадратурного приемника с нелинейными подавителями импульсных и гармонических помех КПИГП и провести сравнительную оценку его помехоустойчивости в условиях, приближенных к условиям функционирования при реализации процесса управления движением поездов. В общем случае реализация цифрового микропроцессорного устройства включает в себя разработку соответствующего аппаратного обеспечения и программного обеспечения (ПО).

Возможны два варианта реализации экспериментального образца КПИГП. Первый – разработка нового аппаратного обеспечения и ПО, реализующего алгоритм обработки сигнала в КПИГП. Данный вариант требует существенных затрат на проектные и конструкторские работы, материалы и компоненты, изготовление устройства. Второй вариант – реализация КПИГП путем модернизации существующего приемника, применяемого в составе аппаратуры КЛУБ-У (ячейка ВУ-1М). Этот вариант требует только разработки ПО, реализующего алгоритм функционирования КПИГП, и перепрограммирования ячейки ВУ-1М. С учетом оценки требуемых затрат на реализацию каждого из вариантов принято решение использовать второй вариант реализации КПИГП.

В локомотивном устройстве безопасности КЛУБ-У приемник сигналов АЛСН реализован в ячейке ВУ-1М, структурная схема которой представлена на рисунке 4.1, а внешний вид – на рисунке 4.2.

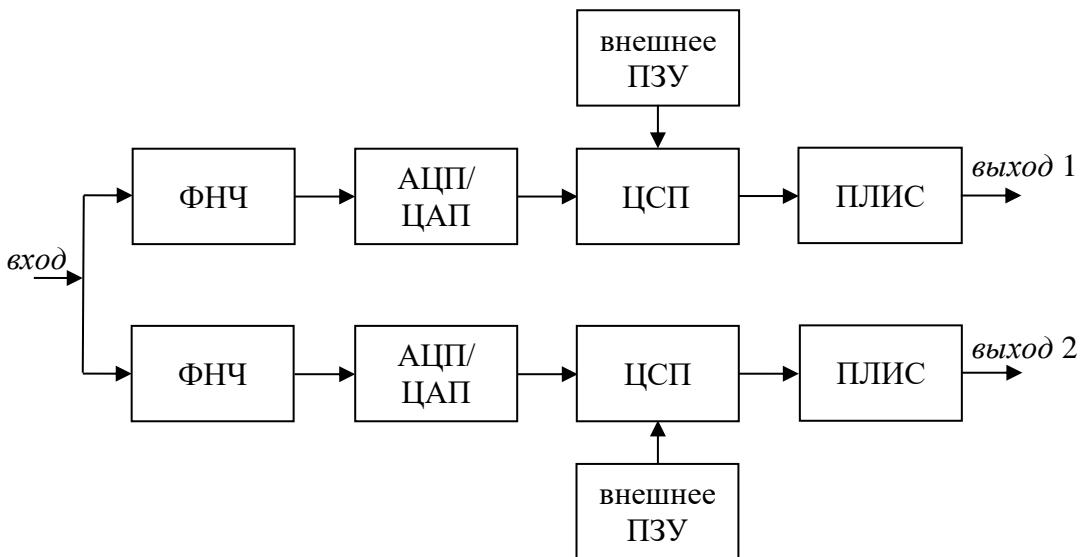


Рисунок 4.1 – Структурная схема ячейки ВУ-1М

Ячейка ВУ-1М представляет собой микропроцессорное устройство, выполненное по двухканальной структуре для обеспечения требуемой надежности и безопасности.

Входной аналоговый сигнал АЛСН, поступающий в ячейку от локомотивных приемных катушек, проходит в каждом канале через аналоговые ФНЧ, реализованные на RC-цепочки. После ФНЧ аналоговый сигнал поступает на вход одноканального 16-битного АЦП/ЦАП, реализованного микросхемой AD73311AR, где оцифровывается.

Затем цифровая обработка сигнала АЛСН в каждом канале осуществляется расположенными на плате цифровыми сигнальными процессорами (ЦСП) ADSP-2186 BST-133, работающими по одной и той же программе [108]. ЦСП ADSP-2186 BST-133 содержат 40 Кбайт встроенной памяти, сконфигурированной как 8 Кслов (24 бит) программной RAM и 8 Кслов данных RAM.

ЦСП на своем выходе формируют логические импульсы и интервалы кодового сигнала АЛСН, поступающие далее на программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) ALTERA EPM7064LI44-15. Последние реализуют интерфейс обмена данными между ЦСП и ячейкой ВУ-2, в которой осуществляется дешифрация кодовых комбинаций принимаемого сигнала АЛСН. Присутствующие на плате ячейки ВУ-1М микросхемы AT29C257

(внешнее ПЗУ) – это программируемая и стираемая флэш-память для расширения ПЗУ ЦСП.

Выведенные на лицевую панель ячейки ВУ-1М светодиоды являются индикаторами принимаемых импульсов кода и сигнала наличия несущей для каждого канала.

Ячейка также содержит модуль питания типа МП-3М-48/5 (на структурной схеме не показан), являющийся DC-DC преобразователем, преобразующим входное постоянное напряжение питания ячейки номинальным значением 48 В в постоянное напряжение номинальным значением 5 В. Он осуществляет питание компонентов платы ячейки.

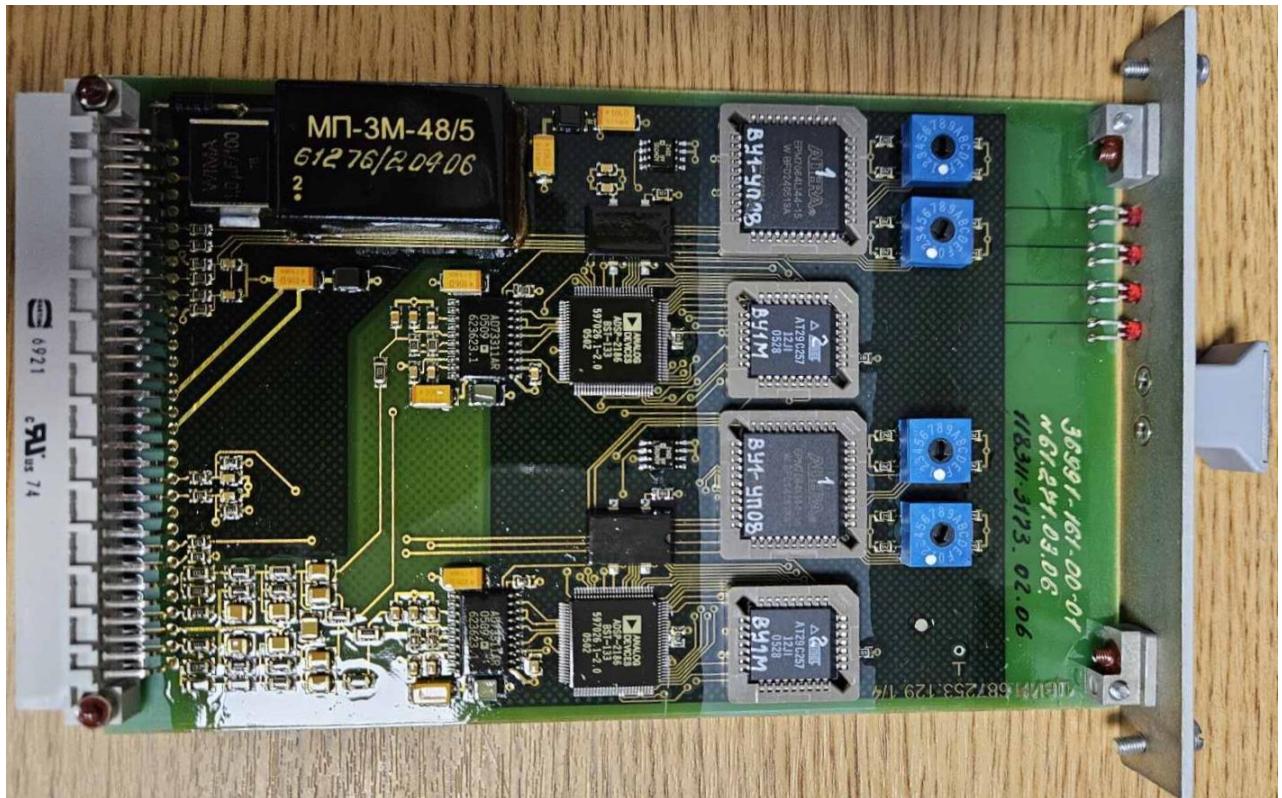


Рисунок 4.2 – Внешний вид ячейки ВУ-1М

Ранее в среде имитационного моделирования Simulink была разработана имитационная модель приемника КПИГП (см. рисунок 3.1). С ее помощью, используя встроенный инструмент среды моделирования Simulink Coder, был получен программный код на языке программирования C++, реализующий

алгоритм функционирования КПИГП [109]. Полученный программный код затем был оптимизирован для экономии памяти и процессорного времени и преобразован в машинный код, пригодный для загрузки в ПЗУ процессора ADSP-2186, посредством компилятора и линкера в среде VisualDSP++. Загрузка полученного машинного кода была осуществлена также в среде VisualDSP++ с помощью встроенных инструментов работы с JTAG-интерфейсом процессора ADSP-2186 BST-133.

Таким образом был получен экспериментальный образец приемника КПИГП в виде ячейки ВУ-1М с ПО, реализующим алгоритм функционирования КПИГП, представленный на рисунке 2.19.

#### **4.2 Разработка методики и стенда для экспериментальной сравнительной оценки помехоустойчивости локомотивных приемников**

В эксперименте оценивалась и сравнивалась помехоустойчивость двух приемников сигналов АЛСН: приемника, функционирующего в составе аппаратуры КЛУБ-У (ВУ-1М), и экспериментального образца ВУ-1М с алгоритмом КПИГП.

Суть методики заключалась в одновременной подаче на вход обоих приемников одинаковых сигналов АЛСН и помех и визуальном анализе осцилограмм выходных сигналов приемников на наличие ошибок в приеме сигналов.

На входы приемников подавались реальные сигналы АЛСН и помехи, записанные с выхода локомотивных приемных катушек грузовых и пассажирских электровозов на участках с электротягой постоянного тока.

Схема регистрации сигналов и помех, использованная при формировании записей, представлена на рисунке 4.3. Запись сигналов на локомотиве производилась на ноутбук через переходной разъем, который подключался на входе блока коммутации цепей локомотива БКЦЛ КЛУБ-У параллельно ЛПК. Сигнал от приемных катушек уменьшался с помощью резистивного делителя

напряжения (РДН) и подавался на вход внешней звуковой карты (ВЗК), подключенной к ноутбуку через USB-интерфейс.

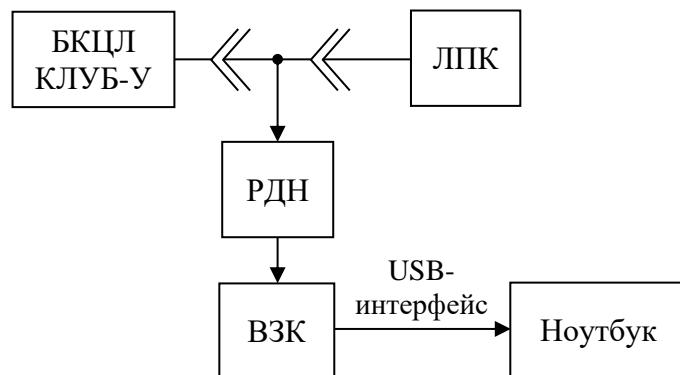


Рисунок 4.3 – Схема регистрации сигналов и помех

На рисунках 4.4 и 4.5 представлены примеры записей (фрагменты 1 и 2 зарегистрированных сигналов и помех), на которых видно наличие импульсных помех, вызванных коммутацией тягового тока. Их особенностью является то, что они как правило представляют собой двуполярные импульсы с амплитудой, в несколько раз превышающей амплитуду сигнала АЛСН. Импульсы помехи при коммутации тягового тока зачастую группируются в пачки продолжительностью до 7 секунд, содержащие до 10-15 импульсов. Импульсы оказывают ударное воздействие на полосовой фильтр локомотивного приемника, искажая форму принимаемого сигнала.

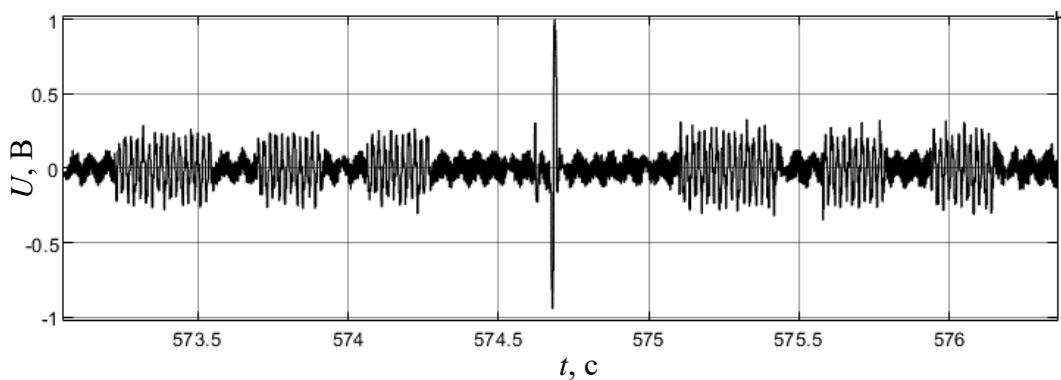


Рисунок 4.4 – Фрагмент 1 записи сигнала и импульсных помех

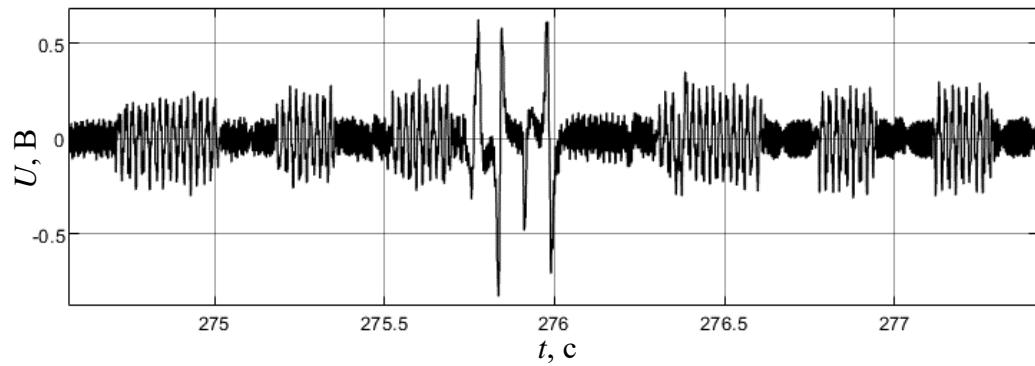


Рисунок 4.5 – Фрагмент 2 записи сигнала и импульсных помех

На рисунках 4.6 и 4.7 представлены соответственно фрагменты 3 и 4 записей сигнала и помех, на которых видно наличие гармонических помех от высоковольтных ЛЭП, пересекающих железнодорожную линию. Амплитуда и длительность помех от ЛЭП таковы, что приводят к ошибкам в приеме сигнала и сбою в работе АЛСН.

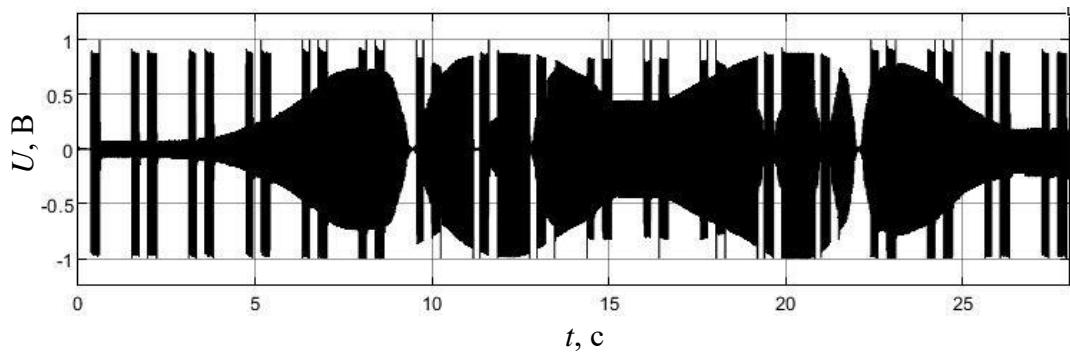


Рисунок 4.6 – Фрагмент 3 записи сигнала и гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП

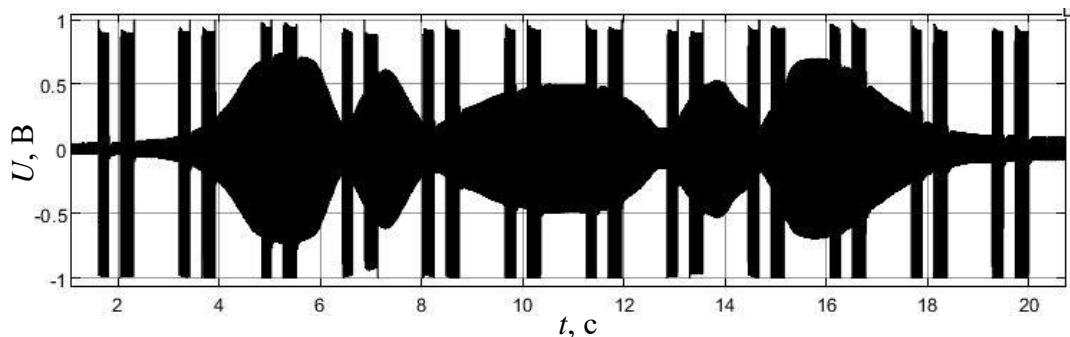


Рисунок 4.7 – Фрагмент 4 записи сигнала и гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП

Общая продолжительность банка записей, использованных в исследовании, составила 70 ч 1 мин. 12 сек. Записи сохранялись в формате \*.wav с частотой дискретизации 11025 Гц и разрешением 16 двоичных разрядов. При записи в формате \*.wav теряется информация об абсолютных значениях записываемого сигнала. Но в сравнительном исследовании важно не столько точное (до мгновенных значений амплитуды) воспроизведение записанного сигнала, сколько обеспечение одинаковых условий функционирования приемников. В данном исследовании одинаковость условий функционирования обеспечивается использованием одного банка записей и параллельной одновременной работой приемников.

Значения записанного в файл формата \*.wav сигнала могут находиться только в диапазоне от минус 1 до 1. При непосредственной подаче воспроизводимого из записи сигнала АЛСН на вход приемника амплитуда сигнала может быть меньше порога чувствительности приемника и такой сигнал не может быть принят. Поэтому необходимо нормирование амплитуды воспроизводимых сигналов АЛСН. Нормирование осуществлялось следующим образом. Все записи при их воспроизведении усиливались по напряжению с коэффициентом усиления  $K_{y_i}$ , определяемым для  $i$ -ой записи таким образом, чтобы на входе приемников выполнялось условие

$$U_{m\ i \text{ воспр } \min} = K_{y\ i} \cdot U_{m\ i \text{ зап } \min} = 396 \text{ мВ},$$

где  $U_{m\ i \text{ воспр } \min}$  — минимальная амплитуда воспроизводимого на входе приемников из  $i$ -ой записи сигнала АЛСН (ее значение соответствует номинальной амплитуде сигнала АЛСН на несущей частоте 50 Гц на входе БЭЛ при электротяге постоянного тока (см. п. 3.2));

$U_{m\ i \text{ зап } \min}$  — минимальная амплитуда сигнала АЛСН в  $i$ -ой записи.

На рисунке 4.8 показаны осциллограммы, демонстрирующие фрагмент записи сигнала АЛСН и помех до усиления (рис. 4.8, *а*) и после его усиления (рис. 4.8, *б*). В данной записи минимальная амплитуда сигнала АЛСН составляет 120 мВ, что значительно ниже порога чувствительности приемника. Для ее увеличения до значения 396 мВ требуется усиление с коэффициентом

$$K_y = \frac{396 \text{ мВ}}{120 \text{ мВ}} = 3,3.$$

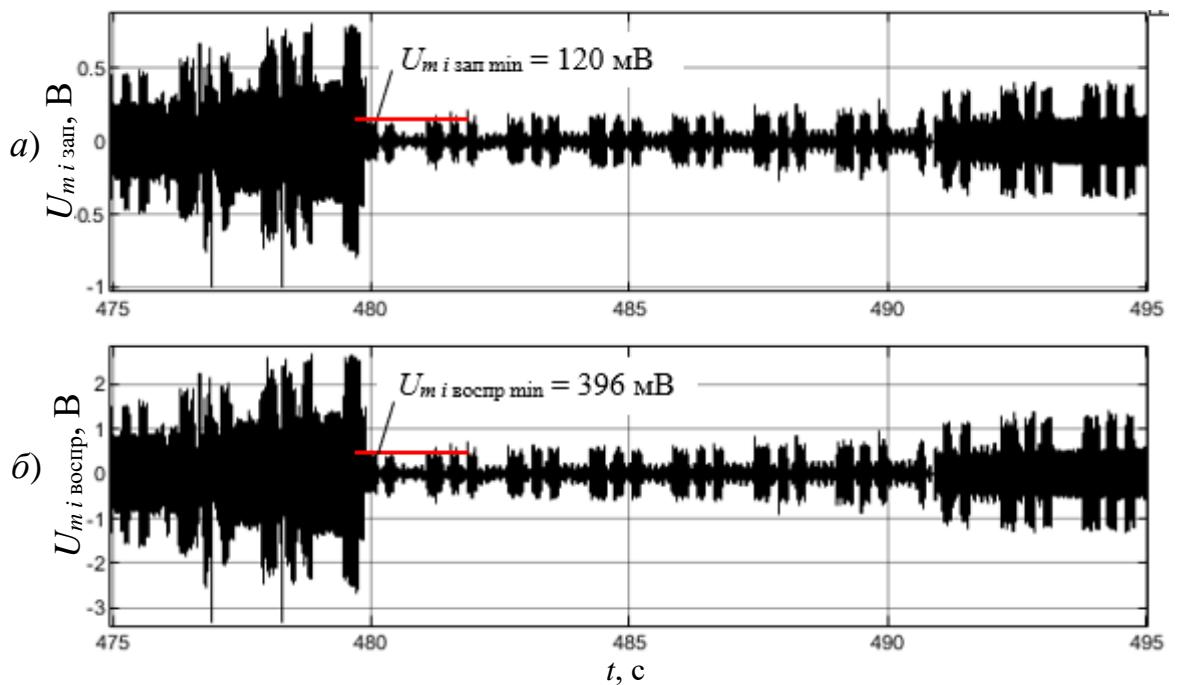


Рисунок 4.8 – Осциллограммы фрагмента записи сигнала АЛСН и помех до усиления (a) и после усиления (б)

Для проведения эксперимента был разработан стенд, структурная схема которого представлена на рисунке 4.9.

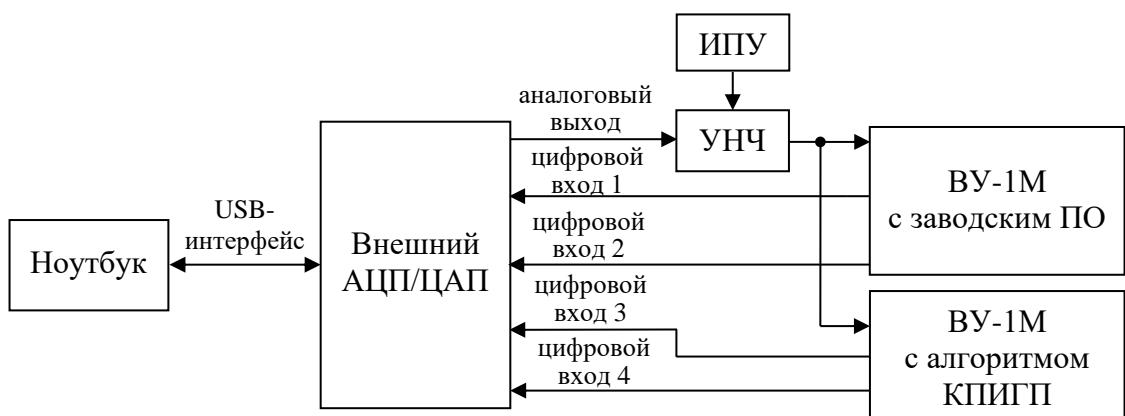


Рисунок 4.9 – Структурная схема стенда для проведения эксперимента

Стенд содержит ноутбук с установленным программным обеспечением MATLAB, внешний АЦП/ЦАП с USB-интерфейсом, низкочастотный усилитель напряжения (УНЧ), источник питания усилителя (ИПУ) и две ячейки ВУ-1М: одна с заводским ПО, вторая – с ПО, реализующим алгоритм функционирования КПИГП. Внешний АЦП/ЦАП представляет собой модуль E14-140-MD с двухканальным ЦАП разрядностью 16 бит, временем установления ЦАП 0,7 мкс, максимальной частотой выдачи данных 200 кГц и выходным напряжением  $\pm 5$  В [110]. Модуль имеет также по 16 цифровых входов и выходов. УНЧ выполнен на базе операционного усилителя DRV134PA с напряжением питания  $\pm 18$  В [111], подаваемым от лабораторного источника питания GPS-3030D [112].

Порядок проведения эксперимента следующий. На ноутбуке с помощью программного пакета MATLAB из \*.wav-файла воспроизводится запись сигнала АЛСН и помех. Далее средствами Data Acquisition Toolbox [113] пакета MATLAB сигнал выводится на ЦАП, с выхода которого аналоговый сигнал подается на вход УНЧ, а с его выхода – на вход ячеек ВУ-1М. Сигналы от приемников (огибающие принимаемого сигнала АЛСН на входе решающих устройств и логические импульсы и интервалы КК АЛСН на выходе приемников) в цифровом виде выводятся из ячеек ВУ-1М и подаются на цифровые входы АЦП, откуда поступают в ноутбук и обрабатываются средствами Data Acquisition Toolbox для визуализации в виде осцилограмм и сохранения в файлы.

При анализе осцилограмм сигналов от приемников так же, как и в экспериментах с воздействием импульсных и флюктуационных помех на имитационные модели приемников (см. п. 3.3.2) выявлялись и подсчитывались ошибки в приеме сигналов АЛСН четырех видов:

- 1) ошибка вида «слияние импульсов» ( $N_{\text{сл}}$  – число выявленных ошибок);
- 2) ошибка вида «ложный импульс» ( $N_{\text{лож}}$  – число выявленных ошибок);
- 3) ошибка вида «дробление импульса» ( $N_{\text{др}}$  – число выявленных ошибок);
- 4) ошибка вида «пропуск импульса» ( $N_{\text{проп}}$  – число выявленных ошибок).

Анализ осцилограмм на наличие ошибок в приеме осуществлялся визуально, подсчет числа ошибок велся вручную.

### 4.3 Анализ результатов эксперимента

Рассмотрим примеры осцилограмм, полученных в ходе эксперимента, на которых представлены примеры возникновения ошибок в работе исследованных приемников при обработке записей сигналов и помех.

На рисунке 4.10 представлены осцилограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «слияние импульсов» в процессе функционирования ВУ-1М.

На рисунке 4.10 и последующих рисунках 4.11-4.13 с осцилограммами представлены следующие сигналы (сверху вниз):

- a)*  $U_{\text{зап}}$  – запись сигнала АЛСН и помех, считываемая из файла и подаваемая на внешний ЦАП/АЦП;
- б)*  $U_{\text{ог сущ}}$  – огибающая сигнала АЛСН на выходе амплитудного детектора для ВУ-1М;
- в)*  $U_{\text{сущ}}$  – сигнал на выходе ВУ-1М (логические импульсы и интервалы принятой КК);
- г)*  $U_{\text{ог КПИГП}}$  – огибающая сигнала АЛСН на выходе квадратурного амплитудного детектора для ВУ-1М с алгоритмом КПИГП;
- д)*  $U_{\text{КПИГП}}$  – сигнал на выходе ВУ-1М с алгоритмом КПИГП (логические импульсы и интервалы принятой КК).

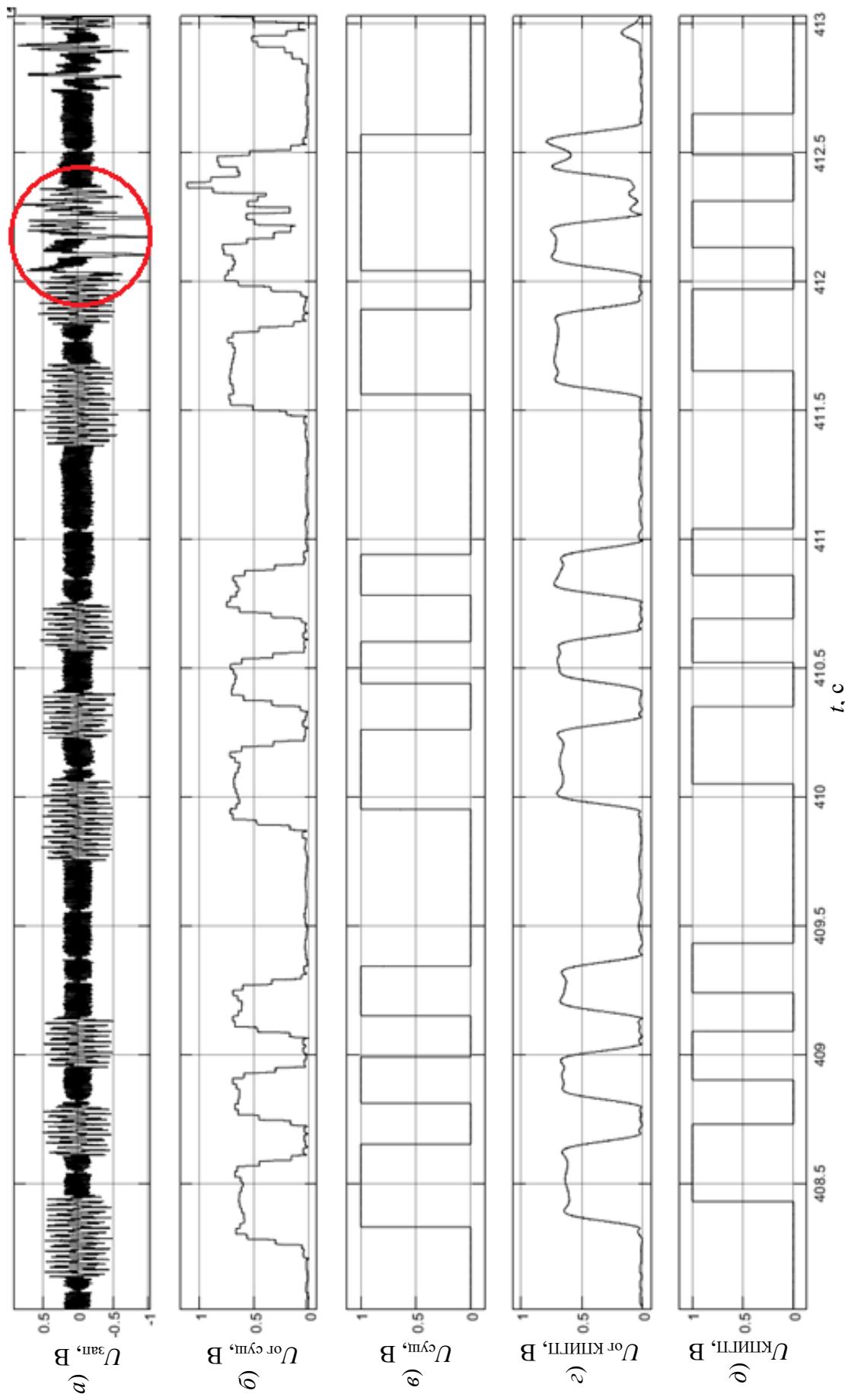


Рисунок 4.10 – Осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «слияние импульсов» в процессе функционирования ВУ-1М

Из рисунка 4.10 видно, что воздействие пачки импульсов помехи в коротком интервале между вторым и третьим импульсами КК «З» (рисунок 4.10, *а*, выделены красным цветом) вызвало всплески огибающей в этом интервале на выходе амплитудного детектора ВУ-1М (рисунок 4.10, *б*). В результате произошло слияние второго и третьего импульсов КК «З» на выходе ВУ-1М (рисунок 4.10, *в*) и, как следствие, трансформация КК «З» в «Ж». В ВУ-1М с алгоритмом КПИГП эти же импульсы помехи были в значительной степени подавлены в ПИП (что демонстрирует график огибающей на выходе квадратурного амплитудного детектора на рисунке 4.10, *г*) и не вызвали ошибки в его работе (рисунок 4.10, *д*).

На рисунке 4.11 показан график спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленных на рисунке 4.10, *а*. Для вычисления спектра из записи был выделен фрагмент длительностью 1 с на интервале от 412 до 413 с, в который попали импульсы помехи. Из графика спектра видно, что в записи присутствуют сигнал АЛСН с частотой несущей 50 Гц, сигнал АЛС-ЕН частотой несущей 175 Гц и сигнал тональной рельсовой цепи с частотой несущей 420 Гц. Импульсы помехи определены составляющими, расположенными преимущественно в области спектра от 5 до 35 Гц с максимумами на частотах 13 и 29 Гц.

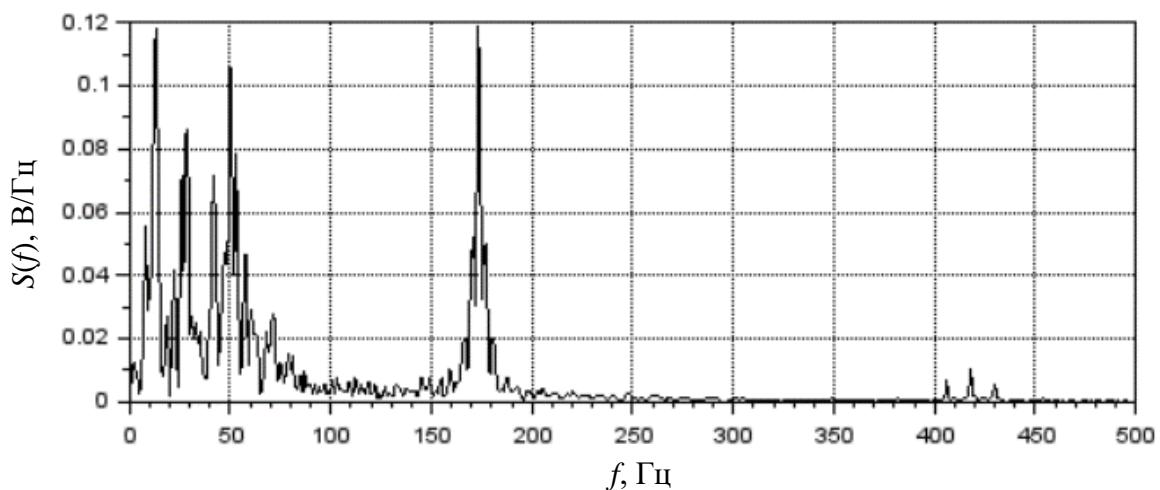


Рисунок 4.11 – График спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленной на рисунке 4.10, *а*

На рисунке 4.12 представлены осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «ложный импульс» в процессе функционирования ВУ-1М.

Воздействие импульсной помехи в длинном интервале КК «3» (рисунок 4.12, *а*, выделена красным цветом) привело к всплеску огибающей на выходе амплитудного детектора ВУ-1М (рисунок 4.12, *б*) и, как следствие, появлению ложного импульса на выходе приемника (рисунок 4.12, *в*). Данный ложный импульс не приведет к трансформации КК, поскольку в соответствии с алгоритмом дешифрации любое количество импульсов в одной КК, равное или большее трех, трактуется как КК «3» [2, 114]. Однако, если бы этот ложный импульс возник в КК «Ж» или «КЖ», то произошла бы трансформация в КК с более разрешающим показанием локомотивного светофора. В ВУ-1М с алгоритмом КПИГП всплеск огибающей, вызванный импульсной помехой, также имеется (рисунок 4.12, *г*), но значительно меньшей амплитуды вследствие подавления импульсов помехи в ПИП и не вызывает появления ложного импульса на выходе приемника (рисунок 4.12, *д*).

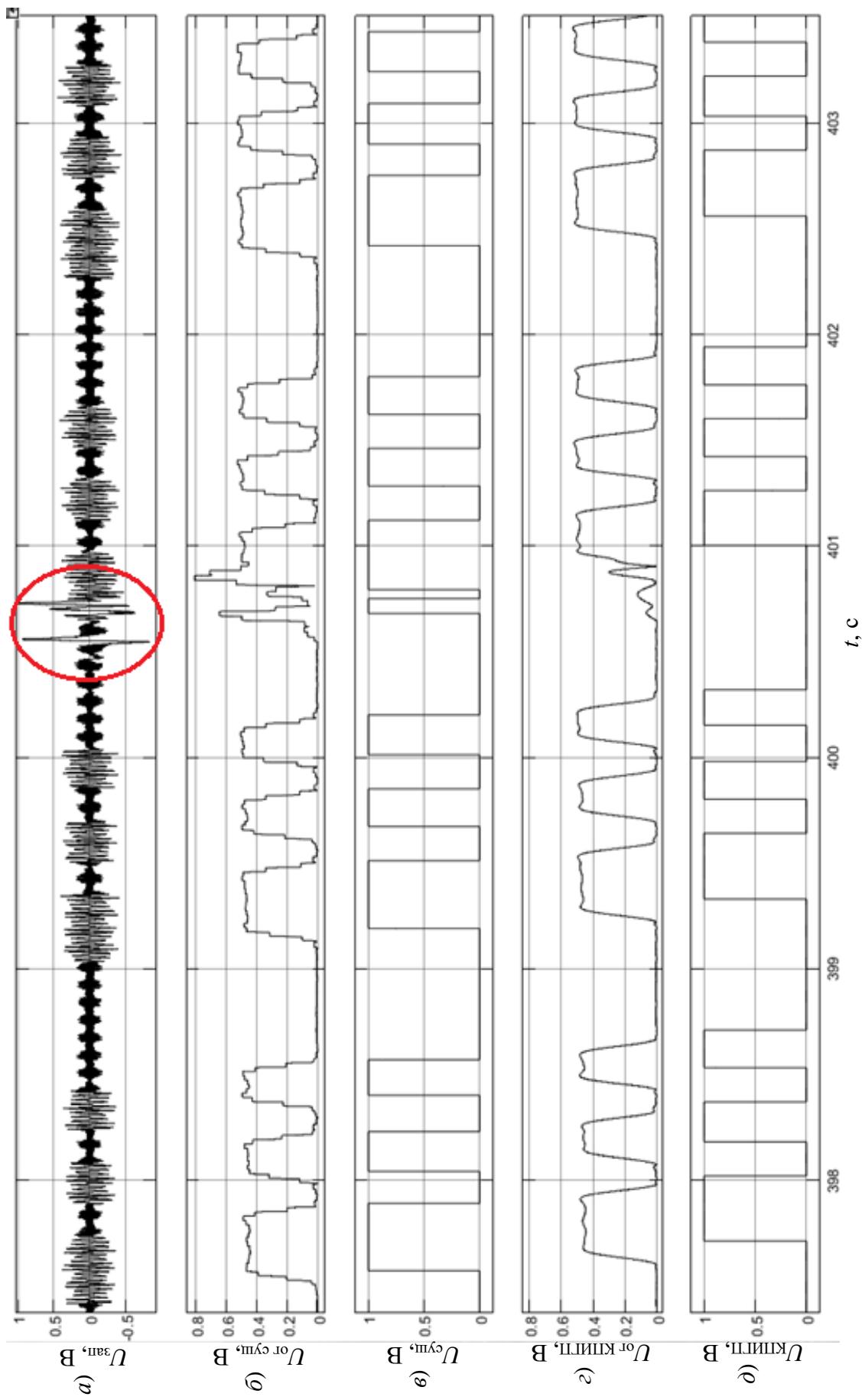


Рисунок 4.12 – Осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «ложный импульс» в процессе функционирования ВУ-1М

На рисунке 4.13 показан график спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленных на рисунке 4.13, *а*. Для вычисления спектра из записи был выделен фрагмент длительностью 1 с на интервале от 400 до 401 с, в который попали импульсы помехи. Из графика спектра видно, что помехи определены составляющими, расположеными преимущественно в области частот от 5 до 45 Гц.

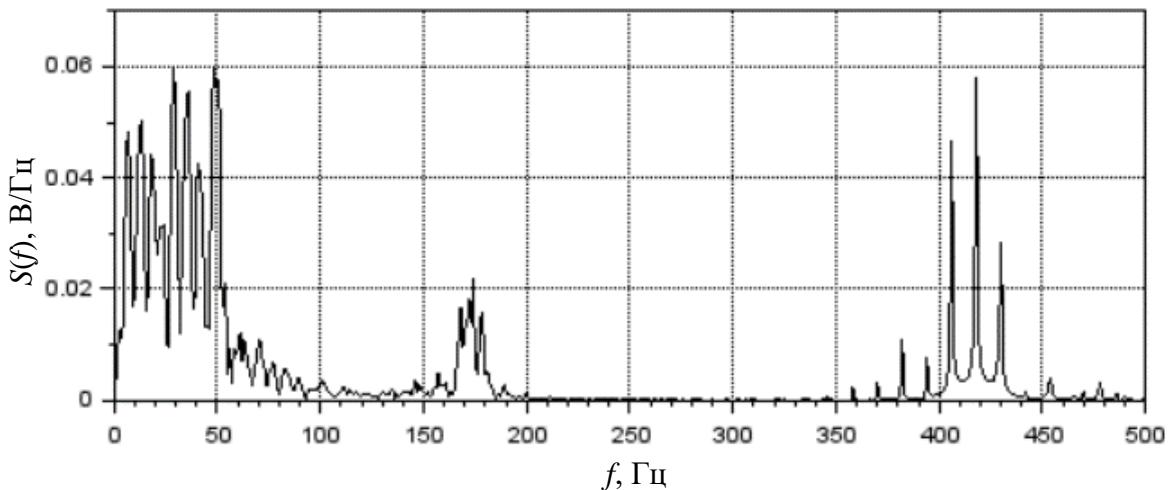


Рисунок 4.13 – График спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленной на рисунке 4.12, *а*

На рисунке 4.14 представлены осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «дробление импульса» в процессе функционирования ВУ-1М. Из осциллограмм видно, что воздействие помех в первом импульсе КК «3» (рисунок 4.14, *а*, выделены красным цветом) вызвало провал огибающей по амплитуде (рисунок 4.14, *б*), в результате чего внутри этого импульса возник ложный интервал (рисунок 4.14, *в*). В ВУ-1М с алгоритмом КПИГП также возник провал огибающей в первом импульсе КК, но с меньшей амплитудой и длительностью на уровне плавающего порога принятия решения (рисунок 4.14, *г*). Дробления импульса на выходе ВУ-1М с алгоритмом КПИГП не произошло (рисунок 4.14, *д*).

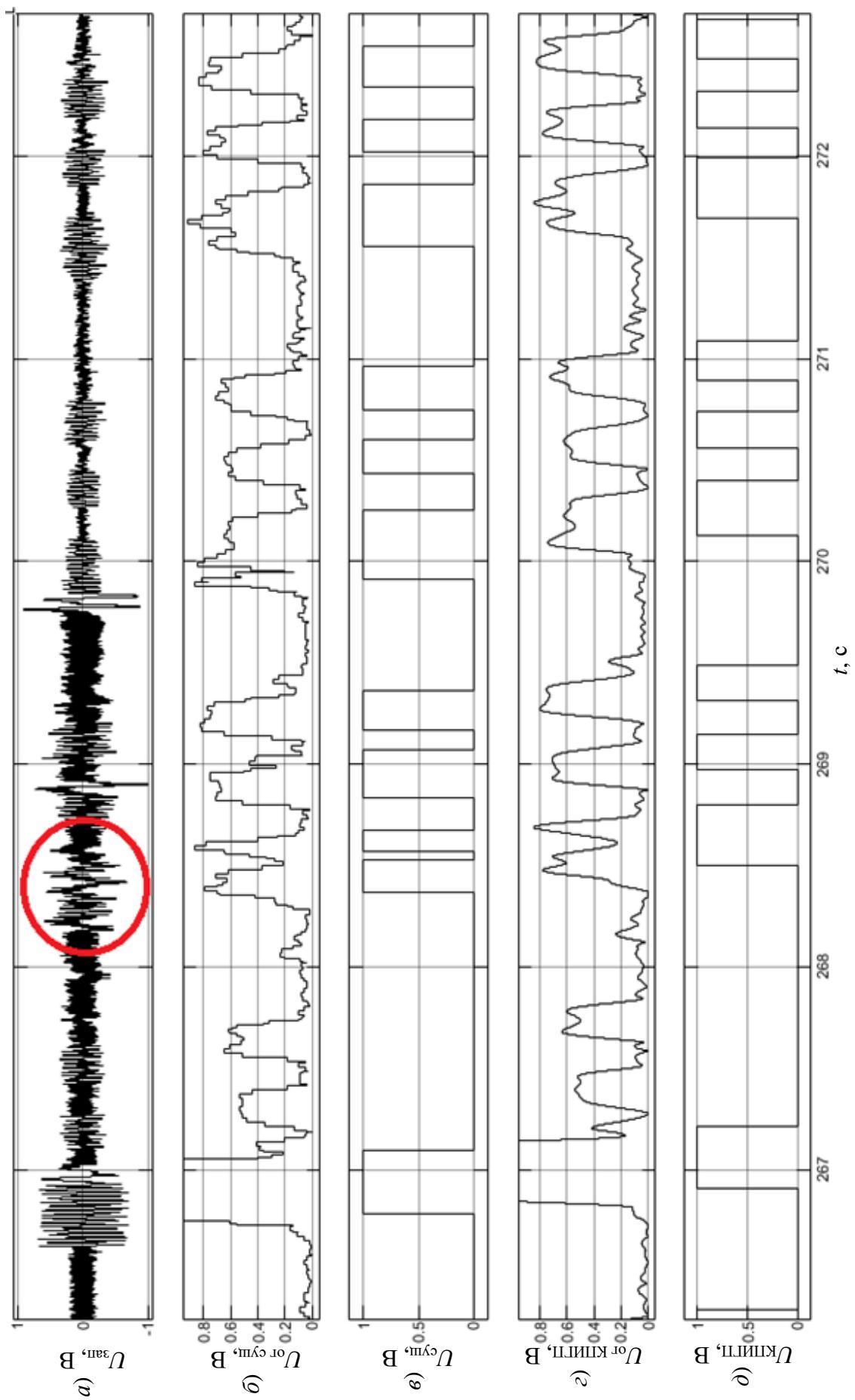


Рисунок 4.14 – Осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «дробление импульса» в процессе функционирования ВУ-1М

На рисунке 4.15 показан график спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленных на рисунке 4.14, *а*. Для вычисления спектра из записи был выделен фрагмент длительностью 2 с на интервале от 268 до 270 с, в который попали импульсы помехи. Из графика данного спектра также видно, что помехи определены составляющими, расположенными преимущественно в области частот от 5 до 45 Гц.

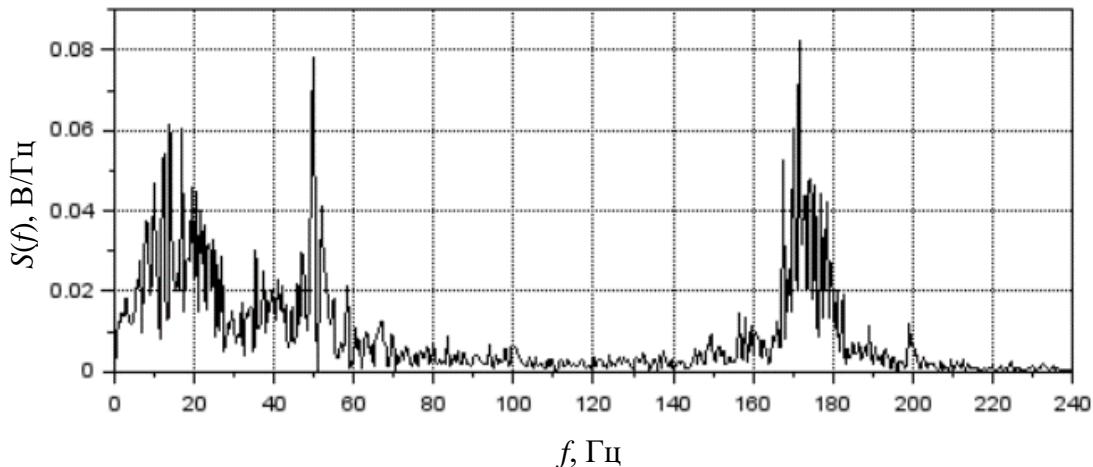


Рисунок 4.15 – График спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленной на рисунке 4.14, *а*

Осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «пропуск импульса» в процессе функционирования ВУ-1М с алгоритмом КПИГП представлены на рисунке 4.16.

Из представленных на рисунке 4.16 осциллограмм видно, что воздействие гармонических помех вызвало значительные искажения огибающей как в ВУ-1М (рисунок 4.16, *б*) так и в ВУ-1М с алгоритмом КПИГП (рисунок 4.16, *г*). В ВУ-1М в результате произошло укорачивание третьего импульса КК «З» (рисунок 4.16, *в*), однако структура КК не пострадала. В ВУ-1М с алгоритмом КПИГП в результате воздействия гармонических помех произошел пропуск третьего импульса КК «З» и она трансформировалась в КК «Ж» (рисунок 4.16, *д*). Дробления импульса на выходе ВУ-1М с алгоритмом КПИГП не произошло.

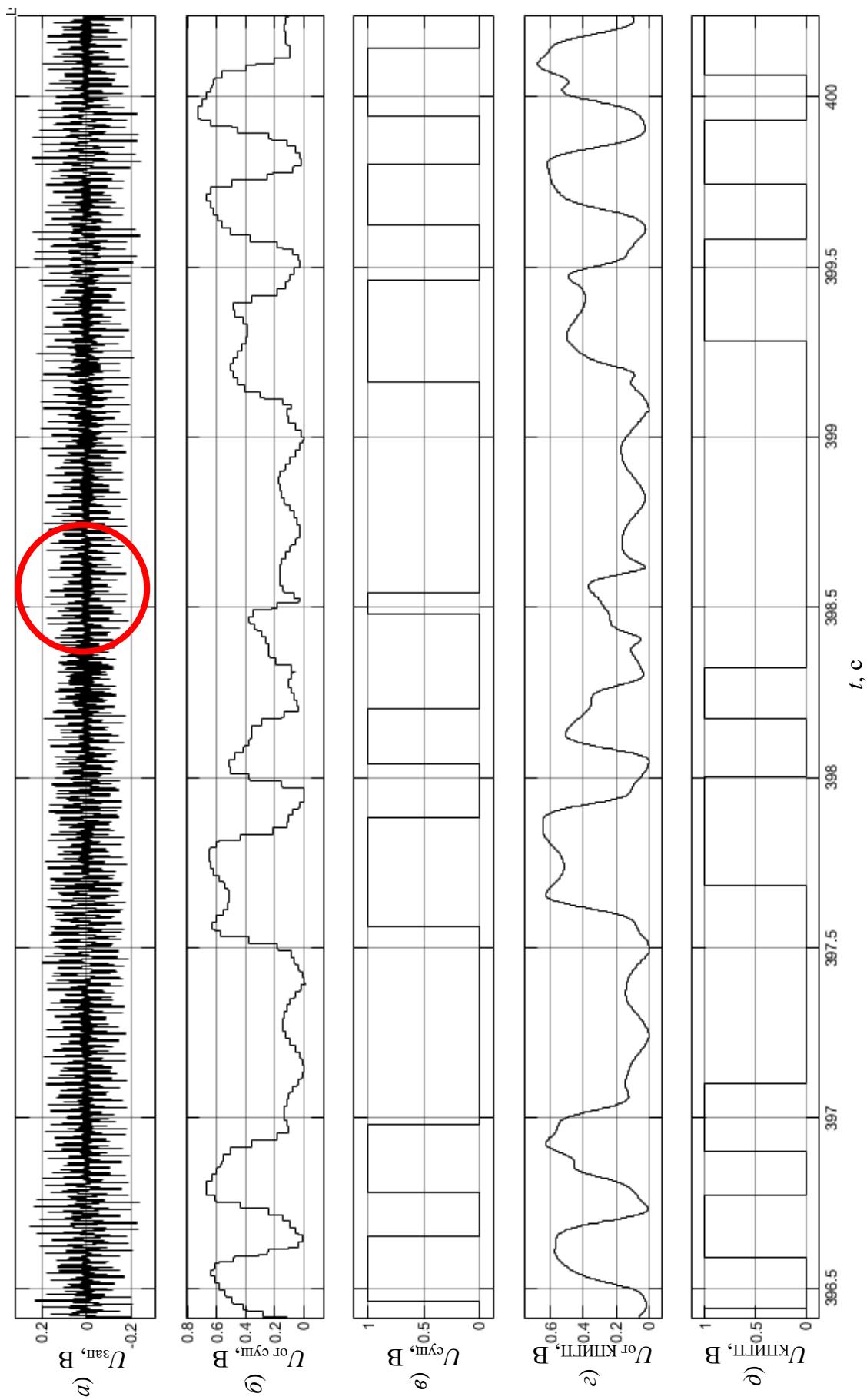


Рисунок 4.16 – Осциллограммы сигналов, демонстрирующих возникновение ошибки вида «пропуск импульса» в процессе функционирования ВУ-1М с алгоритмом КПИГП

На рисунке 4.17 показан график спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленных на рисунке 4.13, *а*. Спектр изображен в диапазоне частот от 0 до 5000 Гц. В спектре присутствует сигнал АЛСН с частотой несущей 50 Гц. Также видно, что во всем представленном диапазоне частот в спектре присутствуют нечетные гармоники тягового тока с частотами, кратными 50 Гц (150, 250, ... Гц). Такой широкий спектральный состав гармонических помех, предположительно, вызван работой тяговых двигателей электровоза в режиме рекуперации.

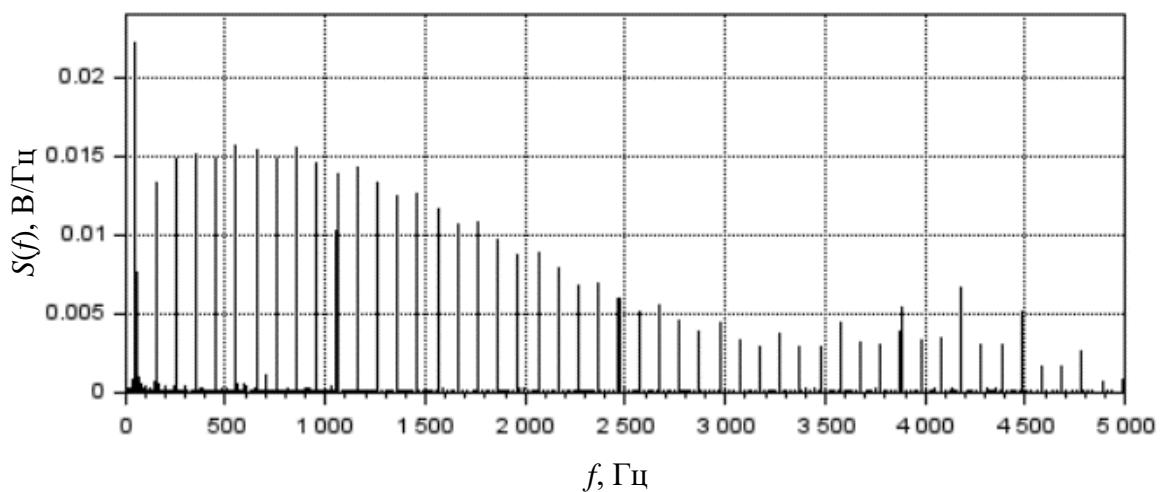


Рисунок 4.17 – График спектральной плотности амплитуд смеси сигнала АЛСН и помех, представленной на рисунке 4.16, *а*

Результаты сравнительной оценки помехоустойчивости ВУ-1М и экспериментального образца ВУ-1М с алгоритмом КПИГП представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты сравнительной оценки помехоустойчивости приемников

Приемник	Число ошибок по видам				Всего ошибок
	$N_{\text{сл}}$	$N_{\text{лож}}$	$N_{\text{др}}$	$N_{\text{проп}}$	
ВУ-1М с заводским ПО	14	312	95	5	426
ВУ-1М с алгоритмом КПИГП	20	12	16	62	110

Согласно представленным в таблице 4.1 данным, для ВУ-1М наиболее частыми (312 из 426, или 73 %) являются ошибки вида «ложный импульс», что говорит о недостаточной помехоустойчивости интервалов кодового сигнала АЛСН в данном алгоритме. Вероятность появления в интервале кодового сигнала помехи, вызвавшей ложный импульс на выходе приемника, увеличивается с увеличением длительности этого интервала. С наибольшей вероятностью возникновение ложного импульса будет происходить в длинных интервалах кодового сигнала. При этом интервал разбивается на две части. Если длительность первой части составит менее 250 мс, то происходит нарушение нормальной обработки циклов КК в дешифраторе (не фиксируется длинный интервал, разделяющий соседние КК). При трех подряд пораженных таким образом длинных интервалах произойдет сбой в работе АЛСН и появление белого огня на локомотивном светофоре. Статистика сбоев в работе АЛСН, приведенная в п. 1.1 (см. рисунок 1.1), показывает, что за период с 2018 по 2022 гг. 66-68 % всех принятых к учету сбоев имело характер кратковременной смены показания локомотивного светофора на белый огонь («3-Б-3», «Ж-Б-3» и «3-Б-Ж»), что подтверждает сказанное.

Из общего числа зафиксированных ошибок в работе ВУ-1М подавляющее число (407, или 95%) являются ошибками вида «ложный импульс» и «дробление импульса». При приеме сигнала КК «Ж» или «КЖ» они приводят к трансформации КК в более разрешающую, что может привести к снижению уровня безопасности движения поездов. Так, как было указано в п. 1.1, в 2022 году доля сбоев с характером проявления «Ж-Б-3» составила 8,9 % от общего количества сбоев.

Для ВУ-1М с алгоритмом КПИГП наиболее частыми (62 из 110, или 56 %) являются ошибки вида «пропуск импульса». Из общего числа ошибок 82 ошибки, или 75 %, являются ошибками вида «слияние импульсов» и «пропуск импульса». Они могут вызвать трансформацию КК в более запрещающую, что может привести к необоснованным снижениям скорости движения поездов, при этом уровень безопасности движения поездов не снижается.

Квадратурный приемник с нелинейными подавителями импульсных и гармонических помех показал уменьшение числа ошибок в приеме кодового

сигнала АЛСН в 3,8 раза в сравнении с ВУ-1М, что говорит о его более высокой помехоустойчивости. Применение реализованного в нем алгоритма обработки сигналов АЛСН в микропроцессорных локомотивных устройствах безопасности позволит уменьшить число ошибок в приеме сигнала АЛСН и тем самым повысить устойчивость функционирования канала АЛСН.

#### **4.4 Выводы по четвертой главе**

1. Разработанная имитационная модель квадратурного приемника с нелинейными подавителями импульсных и гармонических помех и ячейка ВУ-1М канала АЛСН комплексного локомотивного устройства безопасности позволили реализовать экспериментальный образец КПИГП, функционирующий в соответствии с разработанным алгоритмом.

2. С использованием экспериментального образца ВУ-1М с алгоритмом КПИГП и банка записей сигналов АЛСН и помех, зарегистрированных на выходе приемных катушек в реальных поездках грузовых и пассажирских поездов на участках с электротягой постоянного тока, разработаны методика и лабораторный стенд, позволяющие провести сравнительную оценку помехоустойчивости ВУ-1М с алгоритмом КПИГП и ВУ-1М с заводским ПО в одинаковых условиях, приближенных к условиям их функционирования при реализации процесса управления движением поездов.

3. Проведенное исследование помехоустойчивости экспериментального образца ВУ-1М с алгоритмом КПИГП и ВУ-1М с заводским ПО подтвердило сделанный по результатам имитационного моделирования вывод об эффективности применения в приемнике сигналов АЛСН квадратурного детектирования огибающей, нелинейного подавителя импульсных помех с использованием амплитудного ограничителя и бланкирующего устройства, а также нелинейного подавителя гармонических помех с использованием элемента с зоной нечувствительности. Исследование показало более высокую помехоустойчивость ВУ-1М с алгоритмом КПИГП, выразившуюся в 3,8 раза меньшем числе ошибок в

приеме сигнала АЛСН по сравнению с ВУ-1М. При этом для ВУ-1М 95 % ошибок имело вид «ложный импульс» и «дробление импульса», которые могут привести к трансформации КК в более разрешающую, в то время как для ВУ-1М с алгоритмом КПИГП доля таких ошибок не превысила 25 %. Таким образом, ВУ-1М с алгоритмом КПИГП характеризуется более высокой безопасностью функционирования, чем ВУ-1М с заводским ПО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В результате анализа сбоев в работе АЛСН установлено, что воздействие помех является причиной до 18,5 % сбоев. Определено, что для повышения помехоустойчивости приемника перспективными представляются решения, основанные на положениях теории оптимального приема, нелинейном преобразовании сигнала и компенсации помех, реализуемые алгоритмически в микропроцессорном приемнике. При этом задачу приема сигналов АЛСН на локомотиве следует рассматривать как задачу различения сигналов со случайными амплитудой и начальной фазой.

2) Установлено, что оптимальный корреляционный приемник сигналов АЛСН, осуществляющий «прием в целом», не способен обеспечить достоверное различение сигналов. Предложено использовать поэлементный прием сигнала АЛСН с квадратурным амплитудным детектированием огибающей и восстановлением ее амплитуды, позволяющий вследствие инвариантности результата детектирования к начальной фазе принимаемого несущего колебания отказаться от системы фазовой автоподстройки частоты опорных колебаний, что снижает сложность приемника, а восстановление амплитуды огибающей позволяет устраниить снижение его чувствительности.

3) Для эффективного подавления импульсных помех и уменьшения негативного эффекта подавления сигнала предложен способ на основе нелинейного преобразования, отличающийся применением амплитудного ограничения в импульсах сигнала АЛСН и бланкирования в его интервалах. Для реализации предложенного способа разработана методика определения порога амплитудного ограничения или бланкирования, учитывающая временные параметры сигнала АЛСН и условия его распространения по рельсовой линии. Определено значение коэффициента запаса по порогу  $K_{з.пор} = 1,083$ . Показано, что для подавления гармонических помех от ЛЭП эффективным является применение нелинейности с зоной нечувствительности.

4) Разработан алгоритм обработки сигнала АЛСН с применением квадратурного амплитудного детектирования огибающей и восстановления ее амплитуды, нелинейных подавителей импульсных и гармонических помех. Для получения независимых оценок эффективности их применения составлены алгоритмы функционирования квадратурных приемников: без применения нелинейных преобразований; с нелинейным подавлением импульсных помех; с нелинейным подавлением гармонических помех; с нелинейным подавлением как импульсных, так и гармонических помех.

5) Разработаны имитационные модели квадратурных приемников сигналов АЛСН, позволяющие исследовать процесс их функционирования при различных условиях. Исследования на моделях показали, что квадратурные приемники устойчиво функционируют при отклонении частоты несущей от номинального значения на 9 Гц, что многократно превышает допустимые нормами. В сравнении с приемником с амплитудным детектированием на основе скользящего окна и вычитающим устройством квадратурный приемник с нелинейным подавлением импульсных и гармонических помех обеспечивает при воздействии флуктуационной помехи выигрыш в помехоустойчивости в среднем в 1,1-1,2 раза, в безопасности функционирования – в 2,1 раза. При воздействии импульсной помехи получены выигрыши соответственно в среднем в 20,0-33,6 раза и в 86,9 раза. При воздействии гармонической помехи от ЛЭП достигнуто уменьшение на 2,5-7,5 км/ч минимальной скорости движения поезда в зоне влияния ЛЭП с углом пересечения 75-50 °, при которой сбой в работе АЛСН происходить не будет.

6) Технически реализован экспериментальный образец квадратурного приемника с нелинейными подавителями импульсных и гармонических помех. Исследование на записях реальных сигналов АЛСН и помех подтвердило правильность теоретических исследований и результатов моделирования: экспериментальный образец в сравнении с приемником сигналов АЛСН комплексного локомотивного устройства безопасности продемонстрировал более высокую помехоустойчивость, допустив в 3,8 раза меньше ошибок в приеме, и

более высокую безопасность функционирования – доля опасных ошибок уменьшилась с 95 % до 25 %.

Перспективой дальнейшей разработки темы исследования является реализация в приемнике алгоритмов искусственного интеллекта для адаптации к изменяющейся помеховой обстановке.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В настоящей диссертационной работе используются следующие сокращения:

АД – амплитудный детектор на основе скользящего окна;

АДВУ – приемник с амплитудным детектированием на основе скользящего окна и вычитающим устройством;

АЛС – автоматическая локомотивная сигнализация;

АЛС-ЕН – автоматическая локомотивная сигнализация единого ряда непрерывного типа;

АЛСН – автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа;

АО – амплитудный ограничитель;

АСУТ НБД-2 – автоматизированная система учета, анализа и расследования нарушений безопасности движения;

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

БВК – блок возведения в квадрат;

БВКК – блок вычисления квадратного корня;

БВПП – блок вычисления плавающего порога принятия решения;

БЗ – блок задержки;

БЗД – блок защиты от «дребезга»;

БИМ – блок измерения минимумов;

БКПТ – бесконтактный кодовый путевой трансмиттер;

БКТ – бесконтактный коммутатор тока;

БКЦЛ – блок коммутации цепей локомотива комплексного локомотивного устройства безопасности;

БЛОК – безопасный локомотивный объединенный комплекс;

БНП – блок нелинейного преобразования;

БОЧ – блок ограничения чувствительности;

БРГЗН – блок расчета границы зоны нечувствительности;

БРПАОБ – блок расчета порога амплитудного ограничения или бланкирования;

БРС-АЛС – регистратор сигналов автоматической локомотивной сигнализации;

БУ – бланкирующее устройство;

БЭЛ2М2 – блок электроники комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У;

ВСП – верхнее строение пути;

ВУ – вычитающее устройство;

ГЗН – граница зоны нечувствительности;

ГП – гармоническая помеха;

ДКСВ-М – дешифратор кодовых сигналов микропроцессорный;

ЖАТ – железнодорожная автоматика и телемеханика;

ЗН – зона нечувствительности;

ИП – импульсная помеха;

ИПУ – источник питания усилителя;

ИРЛ – индуктивно-рельсовая линия связи;

ИУДП – интервальное управление движением поездов;

КД – квадратурный детектор огибающей;

КИХ-фильтр – фильтр с конечной импульсной характеристикой;

КАДВ – квадратурное амплитудное детектирование огибающей с восстановлением ее амплитуды;

КК – кодовая комбинация;

КЛУБ-У – комплексное локомотивное устройство безопасности унифицированное;

КП – контрольный пункт;

КП – приемник с квадратурным амплитудным детектором без нелинейных преобразований;

КПГП – приемник с квадратурным амплитудным детектором и подавителем гармонических помех;

КПИГП – приемник с квадратурным амплитудным детектором, подавителем импульсных помех и подавителем гармонических помех;

КПИП – приемник с квадратурным амплитудным детектором и подавителем импульсных помех;

КПТШ – кодовый путевой трансмиттер;

КРП – контрольно-ремонтный пункт;

ЛПК – локомотивные приемные катушки;

ЛЭП – высоковольтная линия электропередачи;

МВПС – моторвагонный подвижной состав;

МЛУБ – микропроцессорное локомотивное устройство безопасности;

ОГ – опорный генератор;

ПГП – подавитель гармонических помех;

ПДУ – напольное передающее устройство;

ПЗУ – программируемая и стираемая флэш-память;

ПИП – подавитель импульсных помех;

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;

ПО – программное обеспечение;

ПП – плавающий порог принятия решения;

ПФ – полосовой фильтр;

ПЧ – порог чувствительности;

ПЭ – пороговый элемент;

РДН – резистивный делитель напряжения;

РЛ – рельсовая линия;

РН – рельсовая нить;

РПДА – регистратор параметров движения и автоворедения;

РУ – решающее устройство;

РЦ – рельсовая цепь;

САУТ – система автоматического управления торможением;

СКЗ – среднеквадратическое значение;

ССПС – специальный самоходный подвижной состав;

ССПС-КХ – система обеспечения безопасности движения специального самоходного подвижного состава на комбинированном ходу;

ТШ – трансмиттерное реле;

УК – управляемый коммутатор;

УНЧ – низкочастотный усилитель напряжения;

УПФ – узкополосный фильтр;

ФНЧ – фильтр низких частот;

ФП – флюктуационная помеха;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;

ЦСП – цифровой сигнальный процессор;

ШОУ – широкая полоса-ограничитель-узкая полоса;

ШПФ – широкополосный фильтр;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭЗН – элемент с зоной нечувствительности;

ЭМС – электромагнитная совместимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисенков В. М. Теория автоматических систем интервального регулирования. – Москва: Транспорт, 1987. – 150 с.
2. Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка / А. М. Брылеев, О. Поупе, В. С. Дмитриев [и др.]. Москва: Транспорт, 1981. – 320 с.
3. Системы управления движением поездов на перегонах (часть 1): Функциональные схемы систем. / В М. Лисенков. П.Ф. Бестемьянов. В Б Леушин [и др.]; под ред. В М Лисенкова. – Москва: ФГБУ «УМЦ ЖДТ», 2009 – 160 с.
4. Венцевич Л.Е. Локомотивные устройства обеспечения безопасности движения поездов и расшифровка информационных данных их работы. – Москва: Маршрут, 2006. – 328 с.
5. ОАО «РЖД» сегодня // «Российские железные дороги» : официальный сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9360?redirected> (дата обращения: 04.11.2023).
6. Тягой обеспечены // Газета Гудок : официальный сайт. <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1650844> (дата обращения: 07.11.2023).
7. Шаманов, В. И. Циклы изменения устойчивости работы аппаратуры автоматики на участках с электротягой / В. И. Шаманов // Наука и техника транспорта. – 2018. – № 1. – С. 50-57.
8. Положение о порядке служебного расследования, учета и анализа сбоев в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации и систем автоматического управления торможением поезда : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.05.2016 г. № 1011р. URL: [https://base.garant.ru/71448318/#block\\_1000](https://base.garant.ru/71448318/#block_1000) (дата обращения: 29.09.2023).
9. ГОСТ Р 53431–2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2009-11-27 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. Официальное. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 24 с.

10. Шаманов, В. И. Индуктивная связь локомотивных катушек АЛСН с рельсовыми линиями / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 11. – С. 2-5.
11. Могильников, Ю. В. Влияние тяжеловесных поездов на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН / Ю. В. Могильников // Транспорт Урала. – 2014. – № 2(41). – С. 109-113.
12. Шаманов, В. И. Процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовых линиях / В. И. Шаманов // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 34-38.
13. Пульяков, А. В. Влияние импульсных помех на сигналы автоматической локомотивной сигнализации / А. В. Пульяков, В. В. Демьянов, М. Э. Скоробогатов // Эффективность и безопасность электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте : Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 28 ноября 2019 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 83-91.
14. Шаманов, В.И. Магнитные свойства рельсовых нитей и уровень помех на аппаратуру железнодорожной автоматики и телемеханики / В.И. Шаманов // Электротехника. – 2015. – № 9. – С. 50–55
15. Шаманов В.И. Влияние условий эксплуатации на устойчивость работы АЛСН / В.И. Шаманов, А.В. Пульяков, Ю.А. Трофимов // Железнодорожный транспорт. 2009. – № 5. – С.46-50
16. Пульяков А.В. Анализ влияния неравномерной намагниченности рельсов на устойчивость работы АЛСН / А.В. Пульяков, Ю.А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – Т. 30, №1. – С. 206-210.
17. Трофимов Ю.А. Намагниченность рельсовых плетей и устойчивость работы АЛСН / Ю.А. Трофимов, А.В. Пульяков // Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омск: ОмГУПС, 2011. – С. 46-49.

18. Абрамов, В. М. Влияние остаточной намагнченности рельсов на устойчивость работы АЛСН / В. М. Абрамов, А. Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4(36). – С. 70-76.
19. Пульяков А. В., Соколова В. В. Анализ технических средств, применяемых для уменьшения неравномерности остаточной намагнченности рельсов и их влияния на устройства железнодорожной автоматики //Молодая наука Сибири. – 2020. – №. 3. – С. 141-151.
20. Красногоров, А. А. Бесконтактный кодовый путевой трансмиттер с резервированием / А. А. Красногоров, С. Н. Микушкин, А. Р. Шерфединова // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 5. – С. 22-23.
21. Манаков А. Д. и др. Исследование бесконтактного коммутатора тока на пожарную опасность //Теоретические и практические аспекты развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики. – 2012. – №. 1. – С. 29-39.
22. Манаков, А. Д. Силовые электронные ключи / А. Д. Манаков // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 8. – С. 24-26.
23. Табунщиков, А. К. Оценка влияния электромагнитной обстановки многопутных участков железных дорог на функционирование приемников сигналов автоматической локомотивной сигнализации / А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(55). – С. 74-82. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-74-82
24. Кузьмин, В. С. Оценка чувствительности локомотивных приёмников при использовании испытательных шлейфов со скрещиваниями / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20, № 3(100). – С. 30-38. – DOI 10.30932/1992-3252-2022-20-3-4.
25. Табунщиков, А.К. Новые принципы и направления работ по повышению помехоустойчивости АЛСН / А. К. Табунщиков, Ю.А. Барышев, С. М. Якимов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2017. – С. 201-202.

26. Леушин В. Б. Автоматическая локомотивная сигнализация при наличии помех рельсовых цепей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Леушин Виталий Бениаминович.– Москва, 1985. – 353 с.
27. Юсупов Р. Р. Цифровое устройство обработки сигналов автоматической локомотивной сигнализации повышенной помехозащищенности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Юсупов Руслан Рифович. – Самара, 2003. – 162 с.
28. Мурин, С. А. Локомотивный комплекс регистрации параметров АЛС / С. А. Мурин, Е. Е. Шухина, С. В. Румянцев // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 1. – С. 14-16.
29. Донской А. Л. Автоматизированные системы управления для тягового подвижного состава //Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2008. – № 3. – С. 20-21.
30. Коваленко В. Н., Наговицын В. С., Гришаев С. Ю. Проблема безопасности движения поездов и пути ее решения //Инновационный транспорт. – 2016. – №. 3. – С. 53-59.
31. Комплекс задач общесетевого уровня «Учет и анализ нарушений работы устройств АЛСИ, САУТ, КЛУБ» (К3 АЛСН). Руководство пользователя. 01095505.09003.004.ИЗ.6. 2006. – 65 листов.
32. Толокнов, А. В. Применение К3 АЛСН при расследовании сбоев / А. В. Толокнов // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 7. – С. 15-17.
33. Кузьмин В.С. Повышение качества технического обслуживания локомотивных устройств обеспечения безопасности движения поездов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузьмин Владислав Сергеевич. – Москва, 2023. – 237 с.
34. Гончаров К. В. Синтез цифрового локомотивного приемника автоматической локомотивной сигнализации //Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2013. – №. 1 (43). – С. 30-38.

35. Табунщиков, А. К. Сбои АЛСН. Проблемы и пути их решения / А. К. Табунщиков, Е. В. Горенбейн, Л. И. Стряпкин // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 8. – С. 21-22.
36. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
37. Трофимов Ю. А. Обеспечение электромагнитной совместимости рельсовых цепей и устройств автоматической локомотивной сигнализации с тяговой сетью переменного тока: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трофимов Юрий Анатольевич. – Иркутск, 2006. – 168 с.
38. Бестемьянов, П. Ф. Исследование электромагнитной обстановки на электрифицированных участках железных дорог / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, В. И. Шаманов // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 3-7.
39. Кравцов, Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 7-27.
40. Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методы их проверки / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2. – С. 65-71.
41. Об оценке влияния асинхронных тяговых двигателей на устройства автоматики / Ю. А. Барышев, А. К. Табунщиков, Н. Н. Титова, В. С. Кузьмин // Компетентность. – 2019. – № 8. – С. 48-51.
42. Электромагнитная совместимость устройств локомотивной сигнализации и подвижного состава / Ю. А. Барышев, А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин, Л. И. Кизименко // Компетентность. – 2020. – № 2. – С. 8-11.
43. Об оценке влияния асинхронных тяговых двигателей на устройства автоматики / Ю. А. Барышев, А. К. Табунщиков, Н. Н. Титова, В. С. Кузьмин // Компетентность. – 2019. – № 8. – С. 48-51.
44. Патент на полезную модель № 33921 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации :

№ 2003123230/20 : заявл. 22.07.2003 : опубл. 20.11.2003 / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, К. Э. Блачев, В. И. Зорин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарская государственная академия путей сообщения» (ГБОУ ВПО «СамГАПС»).

45. Патент на полезную модель № 59010 У1 Российской Федерации, МПК B61L 25/06. Приемное устройство для автоматической локомотивной сигнализации : № 2006124216/22 : заявл. 05.07.2006 : опубл. 10.12.2006 / В. И. Шаманов, А. В. Пульяков, Ю. А. Трофимов ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ГБОУ ВПО «ИрГУПС»).

46. Патент на изобретение № 2304061 С1 Российской Федерации, МПК B61L 25/06. Адаптивный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации : № 2005137093/11 : заявл. 30.11.2005 : опубл. 10.08.2007 / В. М. Абрамов, Б. Д. Никифоров, А. Э. Правдолюбов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АВП-Технология» (ООО «АВП-Технология»).

47. Патент № 2796436 С1 Российской Федерации, МПК B61L 25/06. Адаптивный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации : № 2023102852 : заявл. 09.02.2023 : опубл. 23.05.2023 / С. В. Киселева, А. И. Кузьмин, В. С. Миронов [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ОАО «НИИАС»).

48. Патент № 2314223 С2 Российской Федерации, МПК B61L 25/06. Способ дешифрирования сигналов автоматической локомотивной сигнализации и устройство Для его реализации : № 2005123854/11 : заявл. 27.07.2005 : опубл. 10.01.2008 / М. Д. Рабинович, Б. Д. Никифоров, А. Н. Соколов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АВП-Технология» (ООО «АВП-Технология»).

49. Патент на полезную модель № 72670 У1 Российской Федерации, МПК B61L 25/06. Устройство приема и дешифрирования сигналов автоматической

локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН) : № 2007145325/22 : заявл. 07.12.2007 : опубл. 27.04.2008 / В. М. Абрамов, А. М. Вайгель, Л. А. Галченков [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»).

50. Патент на полезную модель № 100991 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Помехоустойчивая автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного действия (АЛСН) : № 2010136212/11 : заявл. 01.09.2010 : опубл. 10.01.2011 / Б. Д. Никифоров, Л. А. Галченков, А. Б. Чегуров, Л. Б. Гаврилов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АВП Технология» (ООО «АВП-Технология»).

51. Патент на полезную модель № 100992 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Устройство для обработки сигналов автоматической локомотивной сигнализации : № 2010138289/11 : заявл. 16.09.2010 : опубл. 10.01.2011 / Ю. А. Кравцов, А. Б. Чегуров, Л. Б. Гаврилов ; заявитель Закрытое акционерное общество «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий» (ЗАО «ОЦВ»).

52. Патент № 2327592 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06, B61L 3/00, B61L 3/20. Способ обработки сигналов автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия и устройство для его реализации : № 2006131039/11 : заявл. 29.08.2006 : опубл. 27.06.2008 / А. Э. Правдолюбов, А. Н. Соколов, Ю. А. Кравцов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АВП-Технология» (ООО «АВП-Технология»).

53. Патент на полезную модель № 87984 У1 Российская Федерация, МПК B61L 23/34. устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2009117398/22 : заявл. 08.05.2009 : опубл. 27.10.2009 / Ю. А. Барышев, А. К. Табунщиков ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (ГБОУ ВПО «МИИТ»).

54. Патент на полезную модель № 47307 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2005105403/22 : заявл. 25.02.2005 : опубл. 27.08.2005 / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин,

К. Э. Блачев ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарская государственная академия путей сообщения» (СамГАПС).

55. Патент на полезную модель № 80422 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2008135005/22 : заявл. 27.08.2008 : опубл. 10.02.2009 / Р. Р. Юсупов, К. Э. Блачев, В. Б. Леушин, Н. Р. Барашкова ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ГБОУ ВПО «СамГУПС»).

56. Патент на полезную модель № 88630 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2009129853/22 : заявл. 03.08.2009 : опубл. 20.11.2009 / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, Н. Р. Барашкова ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ГБОУ ВПО «СамГУПС»).

57. Патент на полезную модель № 99420 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2010124664/11 : заявл. 16.06.2010 : опубл. 20.11.2010 / Н. Р. Барашкова, Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ГБОУ ВПО «СамГУПС»).

58. Патент на полезную модель № 165420 У1 Российская Федерация, МПК B61L 23/00. Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2015155567/11 : заявл. 23.12.2015 : опубл. 20.10.2016 / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, К. Э. Блачев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО «СамГУПС»).

59. Патент № 2533942 С2 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Устройство повышения электромагнитной совместимости автоматической

локомотивной сигнализации с обратной тяговой сетью : № 2013109329/11 : заявл. 01.03.2013 : опубл. 27.11.2014 / А. В. Пульяков, Ю. А. Трофимов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»).

60. Патент на полезную модель № 158180 У1 Российская Федерация, МПК B61L 3/20. устройство автоматической локомотивной сигнализации повышенной помехозащищенности : № 2014140847/11 : заявл. 10.10.2014 : опубл. 20.12.2015 / Ю. А. Барышев, А. К. Табунщиков, И. А. Аргунов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (ФГБОУ ВПО «МИИТ»).

61. Патент на полезную модель № 158579 У1 Российская Федерация, МПК B61L 3/20. Устройство автоматической локомотивной сигнализации с дополнительной компенсацией помех на входе приемника : № 2015118934/11 : заявл. 20.05.2015 : опубл. 10.01.2016 / А. К. Табунщиков, Ю. А. Барышев, И. А. Аргунов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (ФГБОУ ВПО «МИИТ»).

62. Патент № 2618616 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06, H04B 15/00. Устройство подавления импульсных помех на входе локомотивного приемника АЛС : № 2015154775 : заявл. 21.12.2015 : опубл. 04.05.2017 / И. А. Аргунов, Н. Ю. Вихрова, Е. В. Горенбейн [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ОАО «НИИАС»).

63. Патент № 2652676 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Устройство автоматической локомотивной сигнализации с интегрированием принимаемых сигналов : № 2017107858 : заявл. 10.03.2017 : опубл. 28.04.2018 / А.

К. Табунщиков, В. С. Кузьмин, Л. И. Стряпкин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» МГУПС (ФГБОУ ВО «МИИТ»).

64. Патент № 2653658 С1 Российская Федерация, МПК B61L 23/34. устройство автоматической локомотивной сигнализации : № 2017107859 : заявл. 10.03.2017 : опубл. 11.05.2018 / А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин, Н. Н. Титова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» МГУПС (ФГБОУ ВО «МИИТ»).

65. Патент на полезную модель № 202178 U1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06, B61L 3/16. устройство для снижения числа сбоев в работе автоматической локомотивной сигнализации : № 2020132953 : заявл. 06.10.2020 : опубл. 05.02.2021 / В. С. Кузьмин.

66. Патент № 2768302 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Способ приема сигналов из линии индуктивной связи с компенсацией помехи от тягового тока и устройство для его осуществления : № 2021126736 : заявл. 10.09.2021 : опубл. 23.03.2022 / А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин, Р. О. Рядчиков, Н. Н. Титова ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ(МИИТ)»).

67. Патент № 2629831 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/00. Способ защиты устройств автоматической локомотивной сигнализации от аддитивных сосредоточенных помех : № 2016137520 : заявл. 20.09.2016 : опубл. 04.09.2017 / А. С. Архипов, А. А. Горчаков, В. А. Коляда [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ОАО «НИИАС»).

68. Патент № 2754372 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Компенсатор помех в гармоническом низкочастотном сигнале : № 2021108195 :

заявл. 26.03.2021 : опубл. 01.09.2021 / В. И. Шаманов, Д. В. Денежкин ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ(МИИТ)»).

69. Патент № 2795355 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации с функцией восстановления полезного сигнала : № 2022126860 : заявл. 14.10.2022 : опубл. 03.05.2023 / М. Э. Скоробогатов, А. В. Пульяков, В. В. Демьянов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФБОУ ВО «ИрГУПС»).

70. Патент на полезную модель № 94944 У1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. локомотивный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации для участков с электротягой переменного тока : № 2009143604/22 : заявл. 26.11.2009 : опубл. 10.06.2010 / В. И. Шаманов ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (ГБОУ ВПО «МИИТ»).

71. Патент № 2727077 С1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Однополосный цифровой фильтр для автоматической локомотивной сигнализации : № 2019114631 : заявл. 13.05.2019 : опубл. 17.07.2020 / М. Э. Скоробогатов, А. В. Пульяков, В. В. Демьянов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «ИрГУПС»).

72. Оценка эффективности локомотивного цифрового фильтра АЛСН при помощи полунатурных измерений / М. Э. Скоробогатов, А. В. Пульяков, В. В. Демьянов, В. А. Алексеенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 62-69. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_62 и

73. Скоробогатов, М. Э. Оценка запаса по коэффициенту формы сигнала узкополосного локомотивного фильтра / М. Э. Скоробогатов, А. В. Пульяков, В.

В. Демьянов // Образование - наука - производство : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Чита, 07 октября 2021 года. Том 1. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2021. – С. 132-137.

74. Брылеев А.М., Кравцов Ю.А., Шишляков А.В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. Издание второе, переработанное и дополненное. Транспорт, Москва, 1978. – 344 с.

75. Шаманов В. И., Шульц В. А., Ведерников Б. М. Электромагнитные процессы, создающие помехи в работе автоматической локомотивной сигнализации // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2013. № 4(83). – С. 103-108.

76. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования : утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 6 июля 2015 г. № 205. Москва, 2015. – 182 с.

77. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : Справочник – 3-е издание, переработанное и дополненное // В.С. Аркадов, В.Ю. Аркадов, С.В. Казеев, Ю.В. Ободовский. Москва, 2006. – 496 с.

78. Кулик П.Д., Ивакин Н.С., Удовиков А.А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности. – Киев: Издательский дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.

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

80. Технико-нормировочная карта «Электрические рельсовые цепи: измерение сопротивления изоляции рельсовой линии (балласта) в рельсовых цепях длиной более 300м» // № ТНК ЦШ 0188-2015 : утв. ЦШ ОАО «РЖД» от 08.10.2015 г.

81. Оптимальный прием сигналов на фоне помех и шумов // М. Е. Бывшев, А. Ю. Извеков, И. В. Кабаков [и др.]; под ред. Ю. И. Савватеева. – Москва : Радиотехника, 2011. – 423 с.
82. Радиотехнические системы // А. А. Зибров, С. В. Ветров, А. И. Климов [и др.]. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2002. – 189 с.
83. Аксененко, В. Д. Синхронное детектирование методами цифровой обработки сигналов / В. Д. Аксененко, С. И. Матвеев // Навигация и управление движением : материалы докладов IV Конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 12 марта – 30 2002 года / под общей редакцией В.Г. Пешехонова. – Санкт-Петербург: ЦНИИ "Электроприбор", 2002. – С. 225-229.
84. Поляков В. Эксперименты с синхронным детектированием //Радио. – 2001. – №. 4. – С. 20-22.
85. Фомин А.Ф., Ваванов Ю.В. Помехоустойчивость систем железнодорожной радиосвязи. – Москва: Транспорт, 1987. – 295 с.
86. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. – Москва: Машиностроение, 1991. – 336 с.
87. Разработка и анализ методов повышения устойчивости функционирования микропроцессорных приемников АБ-ЧК в условиях воздействия дестабилизирующих факторов: Отчет о НИР (заключ.) / МИИТ; руководитель В. М. Лисенков. – ВФ-3-83; ГР 01820087667; Инв. 0285. – Москва, 1994. – 197 с.
88. Голяницкий И. А., Годунов В. И. Многопозиционные системы оптимальной обработки негауссовых процессов. – Москва: Изд-во МАИ, 1997. – 624 с.
89. Беляков И.В. Теория и методы реализации адаптивных систем контроля состояний рельсовых линий : диссертация ... доктора технических наук : 05.22.08. – Москва, 1996. – 441 с.
90. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов. – Москва: Изд-во МАИ, 2007. – 95 с.

91. Сердюк, Т. Н. Определение параметров кодовой рельсовой цепи / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – 2007. – № 19. – С. 18-22.
92. Сердюк, Т. Н. Автоматизированная система для контроля параметров кодового тока в рельсах / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – 2004. – № 3. – С. 15-20.
93. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007610395 Российская Федерация. Программа формирования помехи косвенного влияния ЛЭП : № 2006613990 : заявл. 24.11.2006 : опубл. 24.01.2007 / В.Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, Н. А. Кравцова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарская государственная академия путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СамГАПС).
94. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007611059 Российская Федерация. Программа формирования помехи прямого влияния ЛЭП : № 2006613888 : заявл. 16.11.2006: опубл. 13.03.2007 / В.Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, Н. А. Кравцова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарская государственная академия путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СамГАПС).
95. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Москва: Изд-во Мир, 1978. – 420 с.
96. Стефанова И. А. Моделирование систем телекоммуникаций в системе MATLAB + Simulink. Самара : Изд-во ПГУТИ, 2018. – 112 с.
97. Хохрин, А. С. О применении нелинейной обработки в квадратурном приемнике сигналов АЛСН / А. С. Хохрин, Р. Р. Юсупов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 4. – С. 20-25.

98. Сороко В.И., Фотькина Ж.В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: справ.: в 5 кн. Кн. 4. 5-е изд. Москва: Планета, 2020. – 1020 с.
99. Адоменас П., Аронсон Я., Бирманас Е. Измерители АЧХ и их применение. Москва: Связь, 1968. – 168 с.
100. Сороко В.И., Фотькина Ж.В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: справ.: в 5 кн. Кн. 5. 5-е изд. Москва: Планета, 2020. – 1120 с.
101. Терминологические особенности этапов разработки и доказательства безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / Д.С. Марков, О.А. Наседкин, Д.А. Васильев, М.А. Бутузов //Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – №. 3. – С. 368-379.
102. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007613357 Российская Федерация. Программа формирования кодового сигнала АЛСН : № 2007612372 : заявл. 13.06.2007 : опубл. 10.08.2007 / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС).
103. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2003612086 Российская Федерация. Программа для формирования импульсной помехи от постоянного тягового тока электроподвижного состава железных дорог: № 2003611479: заявл. 07.07.2003 : опубл. 04.09.2003 / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, К. Э. Блачёв ; заявители Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, К. Э. Блачёв.
104. ГОСТ 33436.3-2-2015 (IEC 62236-3-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-2 Железнодорожный подвижной состав. Аппаратура и оборудование : межгосударственный стандарт : дата введения 2016-10-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. Официальное. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 40 с.

105. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации. – Москва : Связь, 1964. – 359 с.
106. Инструкция по эксплуатации локомотивных устройств безопасности: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.02.2019 № 183/р. // Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». Москва, 2019. – 444 с.
107. Пыров А. Е. Исследование функционирования автоматической локомотивной сигнализации для управления движением поездов на железных дорогах. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук.– МИИТ, 1975.– 253 с.
108. Соловьев А. Цифровые процессоры обработки сигналов фирмы Analog Devices //Компоненты и Технологии. – 2000. – №. 3. – С. 20-21.
109. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687400 Российская Федерация. Программа для расчета мгновенных значений сигнала на выходе квадратурного приемника с нелинейным преобразованием для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН : № 2024686876 : заявл. 11.11.2024 : опубл. 18.11.2024 / Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин, К. А. Хохрина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Приволжский государственный университет путей сообщения" (ФГБОУ ВО ПривГУПС).
110. Преобразователи напряжения измерительные L-CARD E14-140(-М): Руководство пользователя / ООО «Л КАРД». – Москва, 2024. – 67 с.
111. Texas Instruments. Operational amplifier DRV134PA: Datasheet. – Dallas, Texas : Texas Instruments, 2014. – 30 p.
112. Дедюхин А. Источники питания постоянного напряжения и тока компаний Good Will instrument Co. Ltd //Компоненты и Технологии. – 2001. – №. 11. – С. 76-82.
113. Ходосов, В.В. Регистрация аналогового сигнала в Matlab : Балт. гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2019. – 46 с.
114. Горенбейн, Е. В. Сбои кодов АЛСН и их учет / Е. В. Горенбейн, С. В. Лукоянов, В. В. Вологжанин // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 7. – С. 18-22.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

Алгоритмы квадратурных приемников

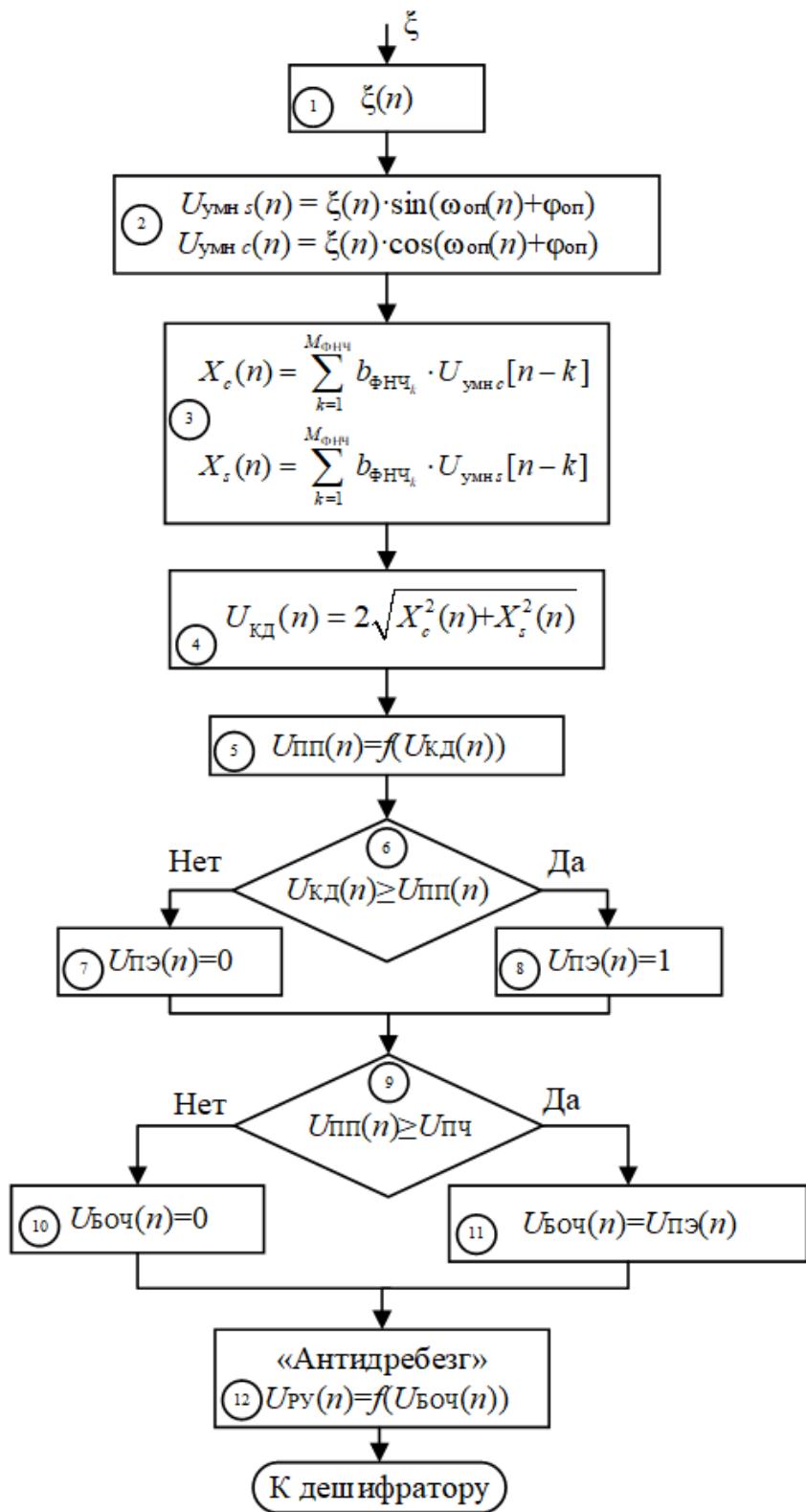


Рисунок П1.1 – Блок-схема алгоритма КП

Алгоритм КП состоит из выполнения следующих шагов.

- Шаг 1. Формируется отсчет  $\xi(n)$  смеси сигнала АЛСН и помех на выходе последовательно включенных ЛПК.
- Шаг 2. Производится перемножение величины  $\xi(n)$  и опорных колебаний в первом и втором квадратурных каналах: вычисляются  $U_{\text{умн},s}(n)$  и  $U_{\text{умн},c}(n)$  соответственно.
- Шаг 3. Вычисляются квадратурные составляющие  $X_c$  и  $X_s$  комплексной огибающей сигнала путем частотной фильтрации КИХ-фильтрами низких частот (ФНЧ);  $b_{\text{ФНЧ},k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{ФНЧ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 4. По квадратурным составляющим вычисляется результат квадратурного детектирования  $U_{\text{КД}}(n)$  – огибающая принимаемого сигнала и восстанавливается ее амплитуда.
- Шаг 5. Вычисляется плавающий порог принятия решения  $U_{\text{ПП}}(n) = f(U_{\text{КД}}(n))$ .
- Шаг 6. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{КД}}(n)$  величины плавающего порога: если «да», т.е.  $U_{\text{КД}}(n) \geq U_{\text{ПП}}(n)$ , то переход к шагу 22; если «нет» –  $U_{\text{КД}}(n) < U_{\text{ПП}}(n)$  – то переход к шагу 21.
- Шаг 7. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  на выходе порогового элемента (ПЭ) решающего устройства принимает значение логического нуля.
- Шаг 8. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  принимает значение логической единицы.
- Шаг 9. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ПП}}(n)$  значения  $U_{\text{ПЧ}}$ , соответствующего задаваемому порогу чувствительности приемника. Если «да», т.е.  $U_{\text{ПП}}(n) \geq U_{\text{ПЧ}}$ , то переход к шагу 25; если «нет» –  $U_{\text{ПП}}(n) < U_{\text{ПЧ}}$  – то переход к шагу 24.
- Шаг 10. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 11. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 12. Выполняется функция «антидребезг»: в величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  игнорируются импульсы (идущие подряд единичные отсчеты) и интервалы (идущие подряд нулевые отсчеты) длительностью менее 70 мс. В результате формируется выходная величина  $U_{\text{РУ}}(n)$  приемника – логический сигнал передаваемой кодовой комбинации АЛСН, поступающий для дальнейшей обработки на вход локомотивного дешифратора.

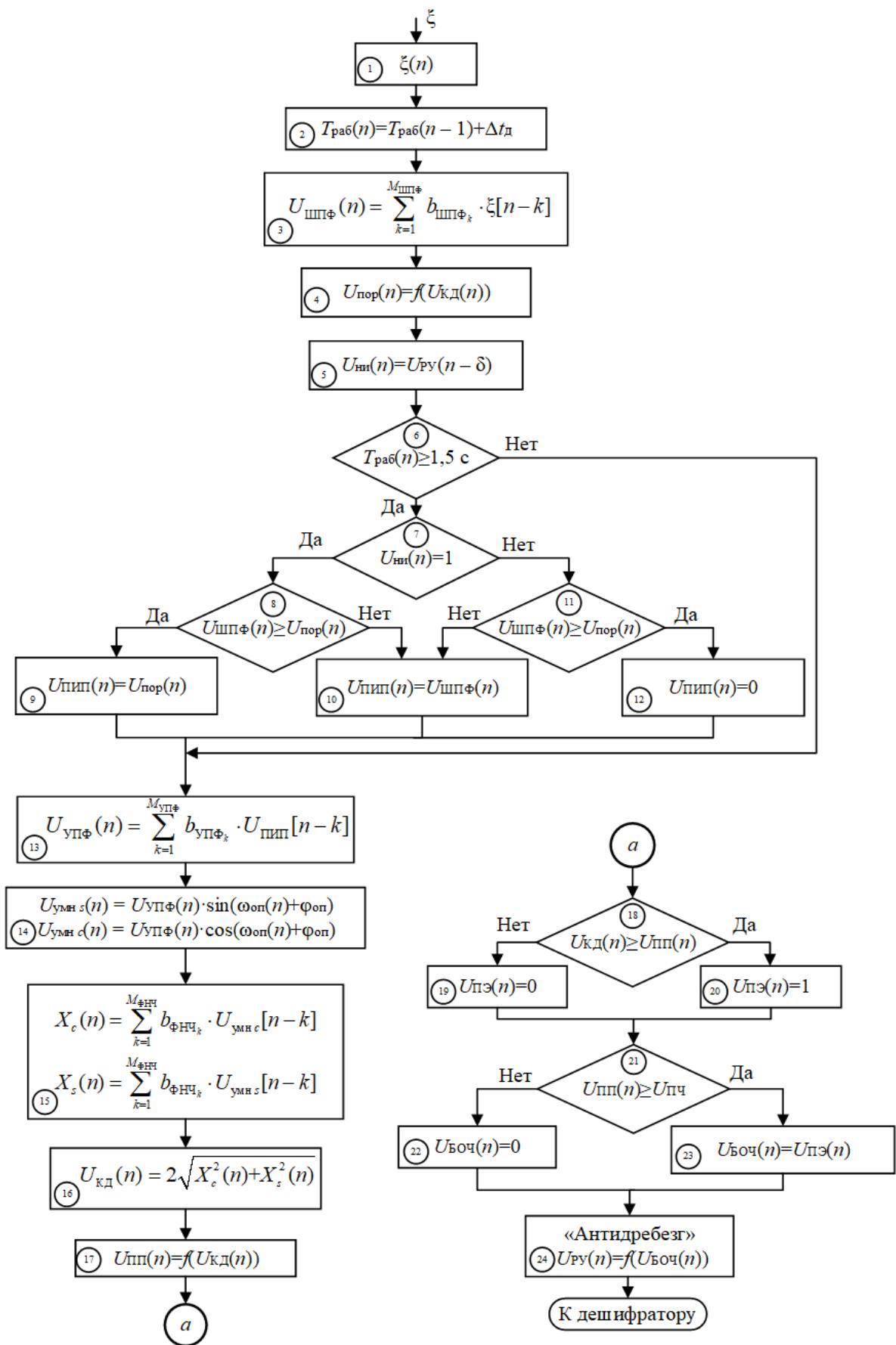


Рисунок П1.2 – Блок-схема алгоритма КПИП

- Шаг 1. Формируется отсчет  $\xi(n)$  смеси сигнала АЛСН и помех на выходе последовательно включенных ЛПК.
- Шаг 2. Время  $T_{\text{раб}}(n)$  работы приемника увеличивается на длительность  $\Delta t_{\text{д}}$  интервала дискретизации сигнала; в момент включения приемника  $T_{\text{раб}}(0) = 0$ .
- Шаг 3. Осуществляется частотная фильтрация принимаемой смеси сигнала и помех посредством широкополосного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра);  $b_{\text{ШПФ} k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{ШПФ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 4. Определяется порог  $U_{\text{пор}}(n)$  амплитудного ограничения или бланкирования по максимальному значению величины огибающей  $U_{\text{КД}}(n)$  сигнала, формируемой в результате квадратурного детектирования.
- Шаг 5. Формируется признак  $U_{\text{ни}}(n)$  наличия на входе АО и БУ импульса принимаемого сигнала АЛСН путем задержки сигнала  $U_{\text{РУ}}(n)$  с выхода порогового решающего устройства (РУ) приемника на  $\delta$  отсчетов.
- Шаг 6. Проверяется время работы приемника: если  $T_{\text{раб}}(n) \geq 1,5$  с, то  $U_{\text{пор}}(n)$  определено с учетом амплитуды принимаемого сигнала АЛСН и можно осуществлять его амплитудное ограничение или бланкирование, осуществляется переход к шагу 7; в противном случае – переход к шагу 13.
- Шаг 7. Проверяется условие наличия импульса сигнала АЛСН: если «да», т.е.  $U_{\text{ни}}(n) = 1$ , то осуществляется переход к шагу 8; если «нет» –  $U_{\text{ни}}(n) \neq 1$  – то переход к шагу 11.
- Шаг 8. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ШПФ}}(n)$  величины  $U_{\text{пор}}(n)$ : если «да», т.е.  $U_{\text{ШПФ}}(n) \geq U_{\text{пор}}(n)$ , то осуществляется переход к шагу 9; если «нет» –  $U_{\text{ШПФ}}(n) < U_{\text{пор}}(n)$  – к шагу 10.
- Шаг 9. Осуществляется амплитудное ограничение:  $U_{\text{ПИП}}(n) = U_{\text{пор}}(n)$ .
- Шаг 10. Бланкирование или амплитудное ограничение не осуществляется:  $U_{\text{ПИП}}(n) = U_{\text{ШПФ}}(n)$ .
- Шаг 11. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ШПФ}}(n)$  величины  $U_{\text{пор}}(n)$ : если «да», т.е.  $U_{\text{ШПФ}}(n) \geq U_{\text{пор}}(n)$ , то осуществляется переход к шагу 12; если «нет» –  $U_{\text{ШПФ}}(n) < U_{\text{пор}}(n)$  – к шагу 10.
- Шаг 12. Осуществляется бланкирование:  $U_{\text{ПИП}}(n) = 0$ .
- Шаг 13. Осуществляется частотная фильтрация посредством узкополосного КИХ-фильтра;  $b_{\text{УПФ} k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{УПФ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 14. Производится перемножение величины  $U_{\text{ШПФ}}(n)$  и опорных колебаний в первом и втором квадратурных каналах: вычисляются  $U_{\text{УМН} s}(n)$  и  $U_{\text{УМН} c}(n)$  соответственно.
- Шаг 15. Вычисляются квадратурные составляющие  $X_c$  и  $X_s$  комплексной огибающей сигнала путем частотной фильтрации КИХ-фильтрами низких частот (ФНЧ);  $b_{\text{ФНЧ} k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{ФНЧ}}$  – порядок фильтра.

- Шаг 16. По квадратурным составляющим вычисляется результат квадратурного детектирования  $U_{\text{КД}}(n)$  – огибающая принимаемого сигнала и восстанавливается ее амплитуда.
- Шаг 19. Вычисляется плавающий порог принятия решения  $U_{\text{ПП}}(n) = f(U_{\text{КД}}(n))$ .
- Шаг 20. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{КД}}(n)$  величины плавающего порога: если «да», т.е.  $U_{\text{КД}}(n) \geq U_{\text{ПП}}(n)$ , то переход к шагу 22; если «нет» –  $U_{\text{КД}}(n) < U_{\text{ПП}}(n)$  – то переход к шагу 21.
- Шаг 21. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  на выходе порогового элемента (ПЭ) решающего устройства принимает значение логического нуля.
- Шаг 22. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  принимает значение логической единицы.
- Шаг 23. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ПП}}(n)$  значения  $U_{\text{ПЧ}}$ , соответствующего задаваемому порогу чувствительности приемника. Если «да», т.е.  $U_{\text{ПП}}(n) \geq U_{\text{ПЧ}}$ , то переход к шагу 25; если «нет» –  $U_{\text{ПП}}(n) < U_{\text{ПЧ}}$  – то переход к шагу 24.
- Шаг 24. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 25. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 26. Выполняется функция «антидребезг»: в величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  игнорируются импульсы (идущие подряд единичные отсчеты) и интервалы (идущие подряд нулевые отсчеты) длительностью менее 70 мс. В результате формируется выходная величина  $U_{\text{РУ}}(n)$  приемника – логический сигнал передаваемой кодовой комбинации АЛСН, поступающий для дальнейшей обработки на вход локомотивного дешифратора.

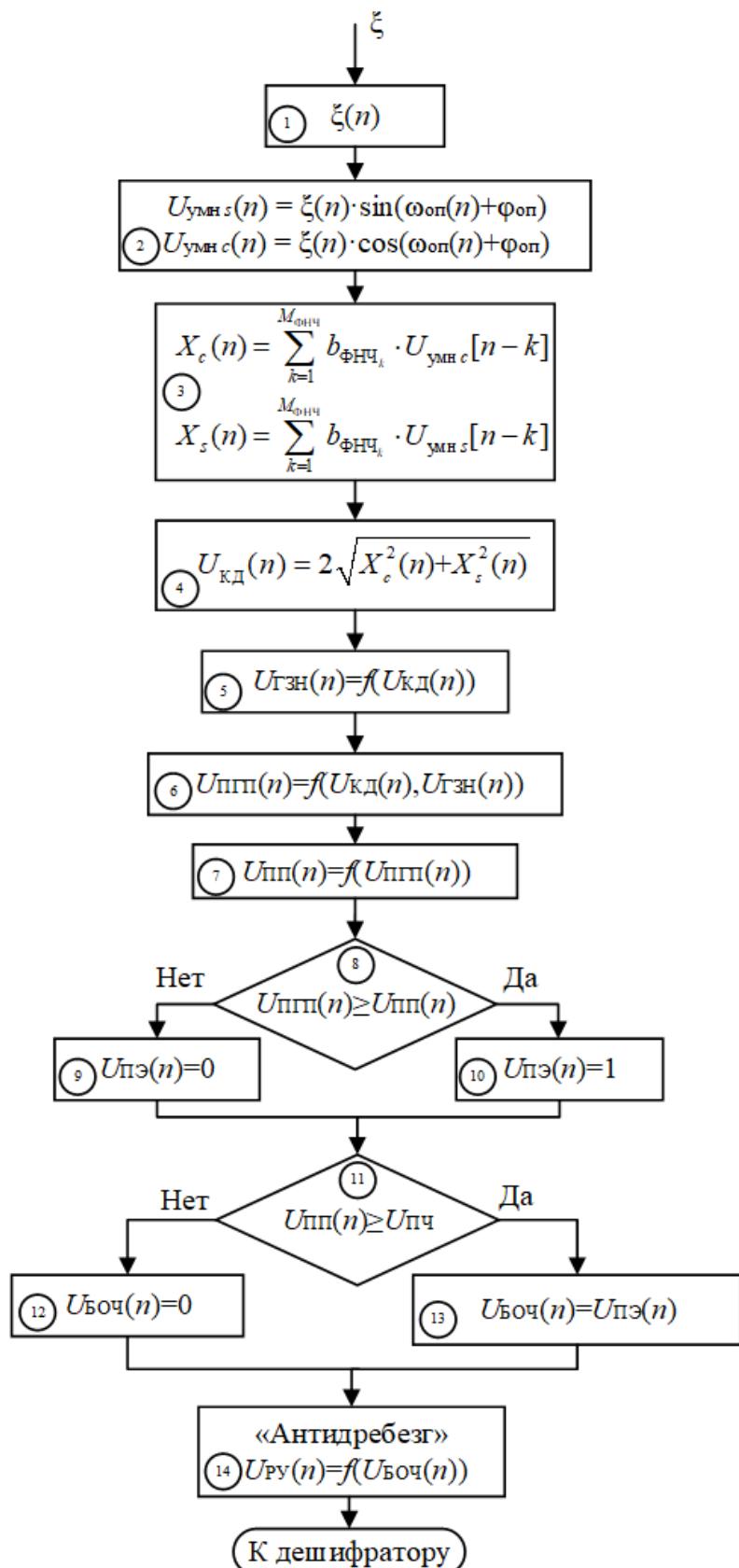


Рисунок П1.3 – Блок-схема алгоритма КПГП

Алгоритм КПГП состоит из выполнения следующих шагов.

- Шаг 1. Формируется отсчет  $\xi(n)$  смеси сигнала АЛСН и помех на выходе последовательно включенных ЛПК.
- Шаг 2. Производится перемножение величины  $\xi(n)$  и опорных колебаний в первом и втором квадратурных каналах: вычисляются  $U_{\text{умн},s}(n)$  и  $U_{\text{умн},c}(n)$  соответственно.
- Шаг 3. Вычисляются квадратурные составляющие  $X_c$  и  $X_s$  комплексной огибающей сигнала путем частотной фильтрации КИХ-фильтрами низких частот (ФНЧ);  $b_{\text{ФНЧ},k}$  – коэффициенты фильтра,  $M_{\text{ФНЧ}}$  – порядок фильтра.
- Шаг 4. По квадратурным составляющим вычисляется результат квадратурного детектирования  $U_{\text{КД}}(n)$  – огибающая принимаемого сигнала и восстанавливается ее амплитуда.
- Шаг 5. По огибающей сигнала вычисляется граница зоны нечувствительности  $U_{\text{ГЗН}}(n) = f(U_{\text{КД}}(n))$
- Шаг 6. В соответствии с вычисленной ГЗН осуществляется нелинейное преобразование в ПГП:  $U_{\text{ПГП}}(n) = f(U_{\text{КД}}(n), U_{\text{ГЗН}}(n))$
- Шаг 7. Вычисляется плавающий порог принятия решения  $U_{\text{ПП}}(n) = f(U_{\text{ПГП}}(n))$ .
- Шаг 8. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ПГП}}(n)$  величины плавающего порога: если «да», т.е.  $U_{\text{ПГП}}(n) \geq U_{\text{ПП}}(n)$ , то переход к шагу 22; если «нет» –  $U_{\text{ПГП}}(n) < U_{\text{ПП}}(n)$  – то переход к шагу 21.
- Шаг 9. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  на выходе порогового элемента (ПЭ) решающего устройства принимает значение логического нуля.
- Шаг 10. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН – величина  $U_{\text{ПЭ}}(n)$  принимает значение логической единицы.
- Шаг 11. Проверяется условие равенства или превышения величиной  $U_{\text{ПП}}(n)$  значения  $U_{\text{ПЧ}}$ , соответствующего задаваемому порогу чувствительности приемника. Если «да», т.е.  $U_{\text{ПП}}(n) \geq U_{\text{ПЧ}}$ , то переход к шагу 25; если «нет» –  $U_{\text{ПП}}(n) < U_{\text{ПЧ}}$  – то переход к шагу 24.
- Шаг 12. Принимается решение об отсутствии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 13. Принимается решение о наличии сигнала АЛСН, равного или большего порогу чувствительности приемника. Величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  на выходе блока ограничения чувствительности (БОЧ) в РУ приемника присваивается значение логического нуля.
- Шаг 14. Выполняется функция «антидребезг»: в величине  $U_{\text{БОЧ}}(n)$  игнорируются импульсы (идущие подряд единичные отсчеты) и интервалы (идущие подряд нулевые отсчеты) длительностью менее 70 мс. В результате формируется выходная величина  $U_{\text{РУ}}(n)$  приемника – логический сигнал передаваемой кодовой комбинации АЛСН, поступающий для дальнейшей обработки на вход локомотивного дешифратора.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

Имитационные модели квадратурных приемников

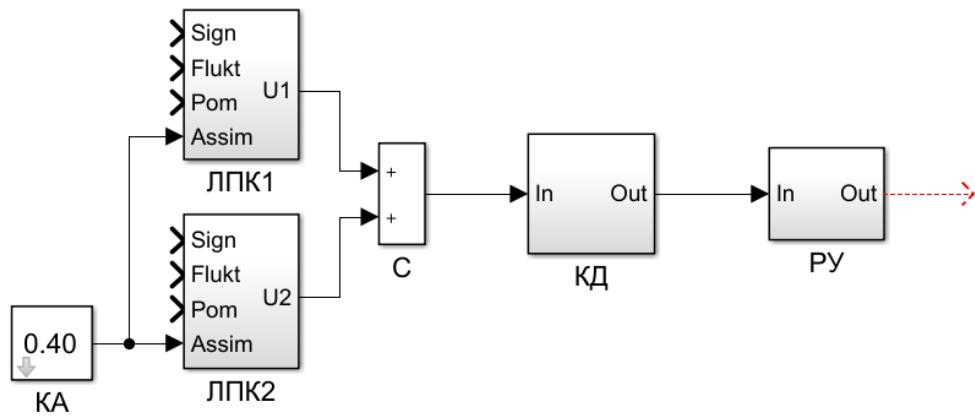


Рисунок П2.1 – Блок-схема имитационной модели КП

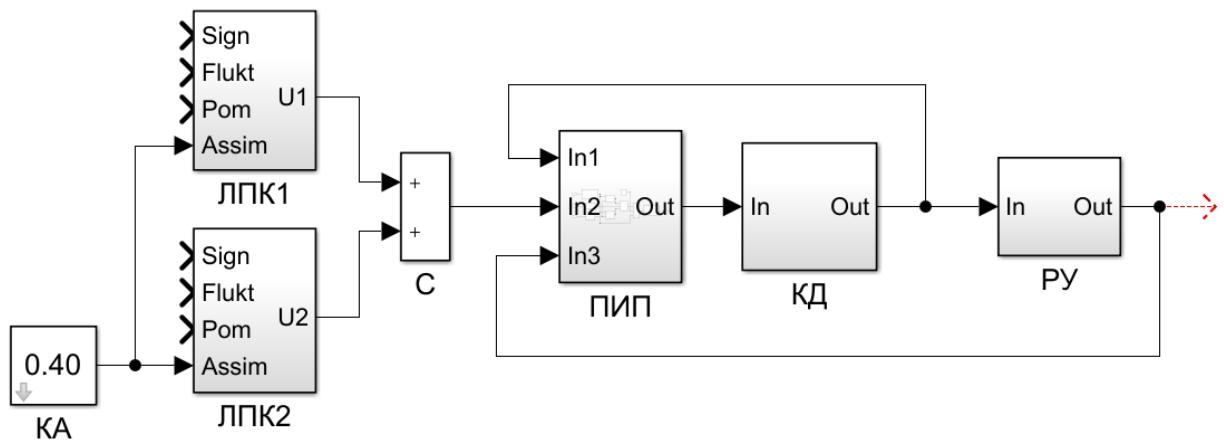


Рисунок П2.2 – Блок-схема имитационной модели КПИП

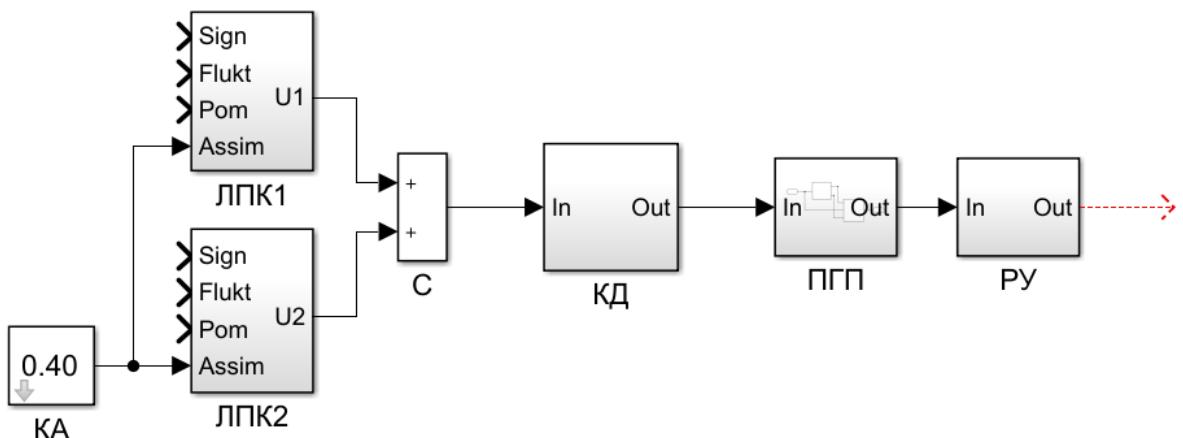


Рисунок П2.3 – Блок-схема имитационной модели КПГП

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

Вероятности ошибок в работе приемников  
при воздействии флюктуационной помехи

Таблица П3.1 – Вероятности ошибок в работе АДВУ при воздействии  
флуктуационной помехи

Таблица П3.2 – Вероятности ошибок в работе КП при воздействии  
флуктуационной помехи

Таблица П3.3 – Вероятности ошибок в работе КПИП при воздействии  
флуктуационной помехи

Таблица П3.4 – Вероятности ошибок в работе КПГП при воздействии  
флуктуационной помехи

Таблица П3.5 – Вероятности ошибок в работе КПИГП при воздействии  
флуктуационной помехи

$h^2$	КК «З <sub>1,6</sub> »					КК «КЖ <sub>1,6</sub> »				
	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$
4	0,0204	0,0074	0,0016	0,0261	0,0555	0,0010	0,0419	0,0004	0,0048	0,0481
6	0,0115	0,0029	0,0006	0,0170	0,0320	0,0002	0,0229	0,0002	0,0047	0,0280
8	0,0068	0,0012	0,0003	0,0114	0,0197	–	0,0114	0,0001	0,0048	0,0165
10	0,0041	0,0004	0,0002	0,0077	0,0124	–	0,0051	0,0001	0,0048	0,0100
12	0,0025	0,0002	0,0001	0,0053	0,0081	–	0,0022	–	0,0043	0,0065
14	0,0016	0,0001	–	0,0037	0,0054	–	0,0008	–	0,0035	0,0043
16	0,0010	–	–	0,0027	0,0037	–	0,0003	–	0,0026	0,0029
18	0,0007	–	–	0,0019	0,0026	–	0,0001	–	0,0019	0,0020
20	0,0004	–	–	0,0014	0,0018	–	–	–	0,0012	0,0012
22	0,0003	–	–	0,0011	0,0014	–	–	–	0,0008	0,0008
24	0,0002	–	–	0,0008	0,0010	–	–	–	0,0005	0,0005
26	0,0001	–	–	0,0006	0,0007	–	–	–	0,0003	0,0003
28	0,0001	–	–	0,0004	0,0005	–	–	–	0,0002	0,0002
30	0,0001	–	–	0,0003	0,0004	–	–	–	0,0001	0,0001
32	–	–	–	0,0003	0,0003	–	–	–	0,0001	0,0001
34	–	–	–	0,0002	0,0002	–	–	–	0,0001	0,0001

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

Вероятности ошибок в работе приемников при воздействии импульсной помехи

Таблица П4.1 – Вероятности ошибок в работе АДВУ при воздействии импульсной помехи

$K_a$ , %	КК «З <sub>1,6</sub> »					КК «КЖ <sub>1,6</sub> »				
	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$
50	0,0579	0,0211	0,0009	0,0060	0,0859	0,0002	0,0658	0,0004	0,0146	0,0810
45	0,0575	0,0187	0,0008	0,0044	0,0814	0,0002	0,0562	0,0003	0,0141	0,0708
40	0,0572	0,0178	0,0006	0,0026	0,0782	0,0002	0,0532	0,0003	0,0132	0,0669
35	0,0537	0,0176	0,0004	0,0013	0,0730	0,0001	0,0509	0,0002	0,0079	0,0591
30	0,0481	0,0188	0,0002	0,0005	0,0674	–	0,0567	0,0001	0,0017	0,0585
25	0,0462	0,0164	0,0001	0,0002	0,0629	–	0,0504	–	0,0001	0,0505
20	0,0354	0,0111	–	0,0001	0,0466	–	0,0375	–	–	0,0375
15	0,0102	0,0004	–	–	0,0106	–	0,0015	–	–	0,0015
10	0,0094	0,0002	–	–	0,0096	–	0,0005	–	–	0,0005
5	0,0010	0,0001	–	–	0,0011	–	0,0003	–	–	0,0003

Таблица П4.2 – Вероятности ошибок в работе КП при воздействии импульсной помехи

$K_a$ , %	КК «З <sub>1,6</sub> »					КК «КЖ <sub>1,6</sub> »				
	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$
50	0,0502	0,0030	0,0007	0,0073	0,0612	–	0,0055	–	0,0315	0,0370
45	0,0498	0,0024	0,0004	0,0046	0,0572	–	0,0045	–	0,0222	0,0267
40	0,0493	0,0020	0,0003	0,0037	0,0553	–	0,0031	–	0,0216	0,0247
35	0,0481	0,0022	0,0001	0,0020	0,0524	–	0,0053	–	0,0079	0,0132
30	0,0465	0,0021	–	0,0006	0,0492	–	0,0060	–	0,0015	0,0075
25	0,0428	0,0018	–	0,0002	0,0448	–	0,0054	–	0,0002	0,0056
20	0,0303	0,0015	–	0,0001	0,0319	–	0,0043	–	0,0001	0,0044
15	0,0104	0,0006	–	–	0,0110	–	0,0019	–	–	0,0019
10	0,0093	0,0002	–	–	0,0095	–	0,0005	–	–	0,0005
5	0,0010	–	–	–	0,0010	–	–	–	–	–

Таблица П4.3 – Вероятности ошибок в работе КПИП при воздействии импульсной помехи

$K_a$ , %	КК «З <sub>1,6</sub> »					КК «КЖ <sub>1,6</sub> »				
	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$
50	0,0147	0,0028	0,0001	0,0019	0,0195	–	0,0083	–	0,0025	0,0108
45	0,0129	0,0025	–	0,0016	0,0170	–	0,0075	–	0,0021	0,0096
40	0,0102	0,0021	–	0,0011	0,0134	–	0,0064	–	0,0014	0,0078
35	0,0067	0,0009	–	0,0008	0,0084	–	0,0035	–	0,0004	0,0039
30	0,0047	0,0004	–	0,0007	0,0058	–	0,0014	–	0,0002	0,0016
25	0,0027	0,0003	–	0,0005	0,0035	–	0,0008	–	0,0002	0,0010
20	0,0008	0,0001	–	0,0003	0,0012	–	0,0001	–	0,0002	0,0003
15	0,0004	–	–	0,0002	0,0006	–	–	–	0,0001	0,0001
10	0,0002	–	–	–	0,0002	–	–	–	–	–
5	0,0001	–	–	–	0,0001	–	–	–	–	–

Таблица П4.4 – Вероятности ошибок в работе КПГП при воздействии импульсной помехи

$K_a$ , %	КК «З <sub>1,6</sub> »					КК «КЖ <sub>1,6</sub> »				
	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$
50	0,0460	0,0030	0,0006	0,0082	0,0578	–	0,0055	–	0,0317	0,0372
45	0,0455	0,0024	0,0004	0,0052	0,0535	–	0,0044	–	0,0224	0,0268
40	0,0446	0,0020	0,0002	0,0042	0,0510	–	0,0031	–	0,0218	0,0249
35	0,0429	0,0021	0,0001	0,0024	0,0475	–	0,0052	–	0,0081	0,0133
30	0,0407	0,0021	–	0,0007	0,0435	–	0,0060	–	0,0015	0,0075
25	0,0351	0,0019	–	0,0003	0,0371	–	0,0054	–	0,0002	0,0056
20	0,0240	0,0015	–	0,0001	0,0256	–	0,0043	–	0,0001	0,0044
15	0,0094	0,0006	–	–	0,0100	–	0,0019	–	–	0,0019
10	0,0083	0,0002	–	–	0,0085	–	0,0005	–	–	0,0005
5	0,0007	–	–	–	0,0007	–	–	–	–	–

Таблица П4.5 – Вероятности ошибок в работе КПИГП при воздействии импульсной помехи

$K_a$ , %	КК «З <sub>1,6</sub> »					КК «КЖ <sub>1,6</sub> »				
	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{сл}}$	$P_{\text{лож}}$	$P_{\text{др}}$	$P_{\text{проп}}$	$P_{\text{ош}}$
50	0,0116	0,0028	0,0001	0,0027	0,0172	–	0,0082	–	0,0026	0,0108
45	0,0099	0,0025	–	0,0024	0,0148	–	0,0073	–	0,0023	0,0096
40	0,0078	0,0020	–	0,0019	0,0117	–	0,0063	–	0,0015	0,0078
35	0,0052	0,0009	–	0,0013	0,0074	–	0,0034	–	0,0004	0,0038
30	0,0036	0,0004	–	0,0009	0,0049	–	0,0013	–	0,0003	0,0016
25	0,0020	0,0003	–	0,0006	0,0029	–	0,0007	–	0,0002	0,0009
20	0,0006	0,0001	–	0,0004	0,0011	–	0,0001	–	0,0002	0,0003
15	0,0003	–	–	0,0002	0,0005	–	–	–	0,0001	0,0001
10	0,0002	–	–	–	0,0002	–	–	–	–	–
5	0,0001	–	–	–	0,0001	–	–	–	–	–

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5**

Значения временного интервала  $T_{\text{оп}}$  при сочетаниях различных значений скорости поезда и угла пересечения ЛЭП

Таблица П5.1 – значения  $T_{\text{ош}}$  при сочетаниях различных значений  $v_{\text{п}}$  и  $\phi_{\text{л}}$ 

$\phi_{\text{л}},$ $^{\circ}$	$v_{\text{п}},$ м/с	$T_{\text{ош}},$ с АДВУ	$T_{\text{ош}},$ с КП	$T_{\text{ош}},$ с КПИП	$T_{\text{ош}},$ с КПГП	$T_{\text{ош}},$ с КПИГП
90	5,0	8,88	8,28	8,28	9,00	8,76
90	7,5	5,52	5,40	5,40	5,64	5,88
90	10,0	3,96	4,20	4,20	4,44	4,44
90	12,5	3,24	3,36	3,36	3,48	3,48
90	15,0	2,76	2,64	2,64	3,00	3,00
90	17,5	2,52	2,40	2,40	2,28	2,28
90	20,0	2,28	2,16	2,16	2,04	2,04
90	22,5	1,68	1,92	1,92	1,80	1,80
90	25,0	1,68	1,68	1,68	1,80	1,80
90	27,5	1,44	1,44	1,44	1,56	1,56
90	30,0	1,44	0,97	0,97	1,32	1,32
90	32,5	1,20	1,20	1,20	1,32	1,32
90	35,0	0,96	1,20	1,20	1,32	1,32
85	5,0	9,00	9,72	9,72	8,28	8,28
85	7,5	5,76	6,60	6,60	5,64	5,64
85	10,0	4,32	4,92	5,64	4,20	4,20
85	12,5	3,60	4,44	4,44	3,48	3,48
85	15,0	2,88	3,72	3,72	3,00	2,76
85	17,5	2,64	3,24	3,24	2,52	2,52
85	20,0	2,16	2,76	3,00	2,28	2,04
85	22,5	1,92	2,76	2,76	1,80	1,80
85	25,0	1,68	2,28	2,52	1,80	1,80
85	27,5	1,32	2,04	2,04	1,56	1,56
85	30,0	1,08	2,04	2,04	1,32	1,32
85	32,5	1,08	1,80	1,80	1,32	1,32
85	35,0	1,08	1,56	1,56	1,32	1,32
80	5,0	11,04	14,76	14,76	11,76	11,76
80	7,5	8,52	9,72	9,72	7,56	7,20
80	10,0	6,36	7,32	7,32	6,00	5,64
80	12,5	4,32	5,64	5,64	4,20	4,20
80	15,0	3,60	4,92	4,92	3,72	3,72
80	17,5	3,12	3,96	3,96	2,76	3,00
80	20,0	2,88	3,72	3,72	2,52	2,52
80	22,5	3,00	3,24	3,24	2,28	2,28
80	25,0	2,16	2,76	2,76	2,28	2,52
80	27,5	1,80	2,52	2,52	2,04	1,80
80	30,0	1,56	2,28	2,52	1,80	2,28
80	32,5	1,32	2,04	2,04	1,80	2,28
80	35,0	1,32	2,04	2,04	1,32	1,32

## Продолжение таблицы П5.1

$\varphi_L$ , $^\circ$	$v_p$ , м/с	$T_{\text{ош}}$ , с АДВУ	$T_{\text{ош}}$ , с КП	$T_{\text{ош}}$ , с КПИП	$T_{\text{ош}}$ , с КПГП	$T_{\text{ош}}$ , с КПИГП
75	5,0	13,80	18,60	18,36	13,20	13,20
75	7,5	9,48	11,64	11,64	8,88	8,40
75	10,0	8,16	8,52	8,52	6,72	6,24
75	12,5	6,72	6,84	6,84	5,52	4,92
75	15,0	5,76	5,64	5,64	4,20	3,96
75	17,5	5,04	4,68	4,68	3,48	3,48
75	20,0	4,56	4,20	4,20	3,00	3,96
75	22,5	4,08	3,72	3,72	2,76	3,48
75	25,0	3,00	3,24	3,24	3,24	3,24
75	27,5	2,76	3,00	3,00	3,00	3,00
75	30,0	3,12	2,76	2,76	2,76	3,00
75	32,5	2,88	2,52	2,52	2,76	1,80
75	35,0	2,88	2,52	2,52	2,28	2,28
70	5,0	15,72	22,20	21,96	14,40	14,40
70	7,5	11,76	14,28	14,28	9,84	10,08
70	10,0	9,12	10,20	9,96	6,96	8,16
70	12,5	7,44	7,80	7,80	5,52	6,48
70	15,0	6,48	6,12	6,36	5,04	6,00
70	17,5	5,76	5,40	5,40	3,96	3,72
70	20,0	5,04	4,68	4,68	4,68	4,68
70	22,5	4,56	4,20	4,20	4,20	3,96
70	25,0	4,32	3,72	3,72	3,96	3,72
70	27,5	3,60	3,24	3,24	3,48	3,48
70	30,0	3,60	3,00	3,00	3,24	3,24
70	32,5	3,36	2,76	2,76	3,00	2,76
70	35,0	3,12	3,36	3,36	2,76	2,52
65	5,0	17,64	24,60	24,60	16,08	16,08
65	7,5	12,72	15,96	15,96	11,28	11,52
65	10,0	9,84	11,88	11,64	8,64	8,64
65	12,5	8,16	8,52	8,52	6,60	7,68
65	15,0	6,96	7,08	7,08	6,24	5,04
65	17,5	6,24	5,88	5,88	4,20	4,20
65	20,0	5,52	5,16	5,16	4,92	4,92
65	22,5	5,04	4,44	4,44	4,68	4,68
65	25,0	4,56	3,96	3,96	4,20	4,44
65	27,5	4,32	4,32	4,32	3,72	3,72
65	30,0	3,84	3,84	3,84	3,72	3,72
65	32,5	3,60	3,84	3,84	3,24	3,48
65	35,0	3,12	3,36	3,12	3,00	3,24

## Продолжение таблицы П5.1

$\varphi_L$ , $^\circ$	$v_\pi$ , м/с	$T_{\text{ош}}$ , с АДВУ	$T_{\text{ош}}$ , с КП	$T_{\text{ош}}$ , с КПИП	$T_{\text{ош}}$ , с КПГП	$T_{\text{ош}}$ , с КПИГП
60	5,0	19,56	27,24	27,24	17,76	17,76
60	7,5	14,16	17,88	17,64	12,48	12,72
60	10,0	11,04	13,08	13,08	9,24	10,56
60	12,5	8,88	9,96	9,48	7,56	8,16
60	15,0	7,44	7,80	7,80	7,20	6,96
60	17,5	6,72	6,60	6,36	6,24	6,00
60	20,0	6,24	5,64	5,64	5,64	5,52
60	22,5	5,52	4,92	4,92	4,92	4,92
60	25,0	4,80	4,80	4,44	4,68	4,68
60	27,5	4,56	4,80	4,80	4,44	4,20
60	30,0	4,08	4,32	4,32	3,96	3,96
60	32,5	3,84	4,08	4,08	3,72	3,72
60	35,0	3,60	3,84	3,84	3,24	3,24
55	5,0	21,72	30,36	30,12	19,68	19,44
55	7,5	15,60	19,80	19,56	13,80	13,68
55	10,0	11,76	14,52	14,28	10,20	11,52
55	12,5	9,60	11,16	11,16	8,28	9,60
55	15,0	8,40	8,28	8,52	7,68	7,92
55	17,5	7,44	7,08	7,08	6,72	6,72
55	20,0	6,48	6,36	6,36	6,00	5,76
55	22,5	6,00	5,64	5,64	5,40	5,28
55	25,0	5,52	5,52	5,52	5,04	5,52
55	27,5	5,04	5,04	5,04	4,68	4,44
55	30,0	4,80	5,04	5,04	4,20	4,20
55	32,5	4,32	4,56	4,56	4,20	4,20
55	35,0	4,08	4,56	4,56	3,72	3,72
50	5,0	23,88	33,72	33,48	22,08	21,84
50	7,5	17,28	21,96	21,96	15,48	14,16
50	10,0	13,20	16,20	16,20	10,80	12,24
50	12,5	10,80	12,60	12,60	10,32	10,32
50	15,0	9,12	9,24	9,24	8,64	8,64
50	17,5	7,92	8,04	8,04	7,68	7,68
50	20,0	6,96	6,84	6,84	6,72	6,96
50	22,5	6,48	6,12	6,12	6,00	6,24
50	25,0	6,00	6,24	6,24	5,76	6,00
50	27,5	5,52	5,76	5,76	5,04	5,04
50	30,0	5,04	5,28	5,28	4,92	4,80
50	32,5	4,80	5,04	5,04	4,44	4,44
50	35,0	4,56	4,80	4,80	4,44	4,20

## Продолжение таблицы П5.1

$\varphi_L$ , $^{\circ}$	$v_P$ , м/с	$T_{\text{ош}}$ , с АДВУ	$T_{\text{ош}}$ , с КП	$T_{\text{ош}}$ , с КПИП	$T_{\text{ош}}$ , с КПГП	$T_{\text{ош}}$ , с КПИГП
45	5,0	27,00	37,80	37,80	24,48	24,48
45	7,5	19,20	24,60	24,60	17,16	15,84
45	10,0	14,64	18,12	18,12	12,84	12,96
45	12,5	12,00	14,28	14,28	9,36	11,52
45	15,0	10,08	11,40	11,16	9,84	9,84
45	17,5	8,88	9,00	9,00	8,64	8,40
45	20,0	7,92	7,56	7,56	7,20	7,20
45	22,5	7,20	6,84	6,84	6,72	7,44
45	25,0	6,72	6,72	6,72	6,48	6,48
45	27,5	6,24	6,24	6,24	5,76	6,00
45	30,0	5,76	6,00	6,00	5,28	5,52
45	32,5	5,04	5,52	5,52	4,92	5,28
45	35,0	4,80	5,28	5,28	4,92	4,80
40	5,0	30,60	42,84	42,84	28,08	27,36
40	7,5	21,60	28,20	27,96	19,56	18,00
40	10,0	16,56	20,76	20,76	14,76	13,44
40	12,5	13,20	16,20	16,20	11,04	12,96
40	15,0	11,52	13,08	13,08	11,28	11,28
40	17,5	9,84	10,44	10,44	9,60	9,60
40	20,0	8,88	9,00	8,76	8,64	8,40
40	22,5	7,92	7,80	7,80	7,68	8,16
40	25,0	7,20	6,84	7,08	7,20	6,72
40	27,5	6,72	6,96	6,96	6,24	6,72
40	30,0	6,24	6,48	6,48	6,00	6,48
40	32,5	5,76	6,00	6,00	5,76	5,76
40	35,0	5,52	5,76	5,76	5,52	5,52

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6**

Результаты интеллектуальной деятельности

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

на полезную модель

№ 218341

ПРИЁМНИК АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Самарский государственный университет путей сообщения (RU)*

Авторы: *Юсупов Руслан Рифович (RU), Хохрин Алексей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023110361

Приоритет полезной модели 22 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 23 мая 2023 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 22 апреля 2033 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 68fb0077e14e10fa94edbd24145d5c7  
Владелец: Зубов Юрий Сергеевич  
Действителен с 26.04.2023 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022685678

**Имитационная модель квадратурного приемника  
сигналов автоматической локомотивной сигнализации  
непрерывного типа АЛСН**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ» (САМГУПС) (RU)**

Авторы: **Юсупов Руслан Рифович (RU), Хохрин Алексей  
Сергеевич (RU), Леушин Виталий Бениаминович (RU)**

Заявка № 2022684474

Дата поступления **13 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **27 декабря 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024615593

**Программа для реализации функций корреляционного приемного устройства автоматической локомотивной сигнализации с нелинейным преобразованием сигнала**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ» (САМГУПС) (RU)**

Авторы: **Юсупов Руслан Рифович (RU), Хохрин Алексей Сергеевич (RU)**

Заявка № 2024613761

Дата поступления **26 февраля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 марта 2024 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024687400

**Программа для расчета мгновенных значений сигнала  
на выходе квадратурного приемника с нелинейным  
преобразованием для автоматической локомотивной  
сигнализации непрерывного типа АЛСН**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Приволжский государственный университет путей  
сообщения" (RU)**

Авторы: **Юсупов Руслан Рифович (RU), Хохрин Алексей  
Сергеевич (RU), Хохрина Кристина Алексеевна (RU)**

Заявка № 2024686876

Дата поступления 11 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 ноября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0692e7c1a6300bf54f2a0f670bcca2026  
Владелец Зубов Юрий Сергеевич  
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025614393

«Имитационная модель квадратурного приемника  
сигналов АЛСН с подавителем импульсных помех»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Приволжский государственный университет путей  
сообщения» (RU)*

Авторы: *Хохрин Алексей Сергеевич (RU), Юсупов Руслан  
Рифович (RU)*

Заявка № 2025612801

Дата поступления 13 февраля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 февраля 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0692e7c1a6300bf54f240f670bca2026  
Владелец Зубов Юрий Сергеевич  
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



**ПРИЛОЖЕНИЕ 7**

Акты об использовании результатов диссертационной работы

**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»**  
**ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ**  
**ИНФРАСТРУКТУРЫ**  
**КУЙБЫШЕВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ**  
**ИНФРАСТРУКТУРЫ**  
**КИНЕЛЬСКАЯ ДИСТАНЦИЯ**  
**СИГНАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ**  
**И БЛОКИРОВКИ**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Начальник Кинельской дистанции  
сигнализации, централизации и  
блокировки

В.В. Федотов  
«19» марта 2025 г.

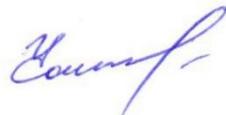
**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы Хохрина Алексея  
Сергеевича на тему «Помехоустойчивый приемник для канала автоматической  
локомотивной сигнализации непрерывного типа»

Настоящим актом удостоверяется, что способ подавления импульсных  
помех на основе нелинейного преобразования в виде амплитудного  
ограничения и бланкирования, предложенный Хохриным А.С. в процессе  
работы над кандидатской диссертацией, использован в техническом задании  
при совершенствовании устройств защиты приемной аппаратуры  
эксплуатируемых на Куйбышевской железной дороге числовых кодовых  
рельсовых цепей от помех, вызываемых тяговым током.

Разработанная методика определения порога амплитудного ограничения  
или бланкирования импульсных помех позволит учесть влияние  
дестабилизирующих климатических факторов (температура и влажность  
окружающей среды) на условия распространения сигнального тока по  
рельсовой линии. Это позволит снизить влияние помех и, тем самым, повысить  
устойчивость функционирования рельсовых цепей.

Заместитель начальника  
Кинельской дистанции СЦБ



С.В. Чаплыгин



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
 ОБРАЗОВАНИЯ  
**ПРИВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**  
 (ПривГУПС)

«УТВЕРЖДАЮ»



М.А. Гаранин

» март 2025 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
 Хохрина Алексея Сергеевича на тему «Помехоустойчивый приемник для  
 канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа» в  
 учебном процессе Приволжского государственного университета путей  
 сообщения

Мы, нижеподписавшиеся, проректор по учебной работе и цифровой  
 трансформации к.э.н., доцент Кожевникова С.А., декан Электротехнического  
 факультета к.т.н., доцент Блинкова С.А., заведующий кафедрой «Автоматика,  
 телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» д.т.н., профессор  
 Тарасов Е.М. составили настоящий акт о том, что результаты кандидатской  
 диссертации Хохрина А.С. используются в учебном процессе на кафедре  
 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»  
 ПривГУПС, а именно:

1. в курсе «Теория передачи сигналов» при проведении лекционных занятий для ознакомления студентов с методами и возможностями подавления

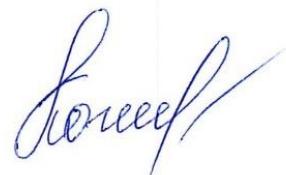
помех в линиях связи посредством нелинейной обработки сигналов, а также при выполнении практических работ и курсовой работы для моделирования процессов оптимального приема сигналов в системах передачи дискретных сообщений;

2. в курсе «Микропроцессорные и микроэлектронные системы перегонной автоматики» используется экспериментальный образец помехоустойчивого приемника сигналов АЛСН в составе лабораторного стенда «Микропроцессорное комплексное локомотивное устройство безопасности КЛУБ-У» при выполнении студентами лабораторных работ.

Проректор по учебной работе  
и цифровой трансформации

Декан ЭТФ

Заведующий кафедрой АТС



С.А. Кожевникова



С.А. Блинкова



Е.М. Тарасов