

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
ФГБОУ ВО РГУПС

На правах рукописи



Шандыбин Алексей Викторович

«ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПОНЕНТОВ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПРИ ВНЕШНИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ»

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
профессор
Таран Владимир Николаевич

Ростов-на-Дону – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ.....	11
1.1 Обзор современных методов общей теории электротехнических комплексов.....	11
1.2 Методы защиты от наводимых воздействий.....	15
1.3 Математический аппарат и методы	25
1.4 Постановка задачи	31
1.5 Рамки исследования.....	31
1.6 Выводы по главе.....	32
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	34
2.1 Сведение уравнений электромагнитного поля к модельным задачам	34
2.2 Вычислительные алгоритмы решения уравнений электростатики и магнитостатики.....	37
2.3 Исследование точности модельных примеров	43
2.4 Исследование основной модели воздействия	48
2.5 Сопоставление модельных и экспериментальных данных.....	61
2.6 Выводы по главе.....	65
3 СИНХРОНИЗАЦИЯ В УСТРОЙСТВАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ.....	67
3.1 Синхронизация и факторы, влияющие на ее устойчивость	67
3.2 Повышение устойчивости синхронизации к наведенным помехам в цифровых устройствах управления электротехническими комплексами.....	74
3.3 Представление уравнения Стратоновича в виде совокупности агентов. 78	78
3.4 Натурное моделирование совокупности агентов	80
3.5 Выводы по главе.....	86
4 СИНТЕЗ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	88

4.1 Алгоритмы выбора систем защиты.....	88
4.2 Статистическая обработка результатов измерений.....	90
4.3 Синтез устройства активной компенсации наводимых токов	102
4.4 Синтез устройства активной компенсации линейных и квадратичных составляющих наводимых токов.....	109
4.5 Проверка реализуемости устройства активной компенсации наводимых токов.....	115
4.6 Алгоритм работы комплексной системы защиты	120
4.7 Выводы по главе.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А Фрагменты программы вычисления электростатических и магнитостатических полей с применением метода конечных элементов, написанной на Mathcad.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Фрагменты программы вычислений электростатических и магнитостатических полей с применением метода конечных элементов, написанной на C++.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В Математическое моделирование участка железной дороги	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Г ПРОГРАММА И МЕТОДИКА Испытаний по измерению параметров электромагнитного влияния внешних факторов на воздушные и кабельные линии ОТС	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Д ПРОТОКОЛ измерений параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии ОТС на участках Северо- Кавказской железной дороги	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Патентная документация	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Акты и свидетельства.....	171

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Транспортный электротехнический комплекс, включая железнодорожный транспорт, содержит обширный ряд взаимосвязанных компонентов. Электрифицированный подвижной состав является основой железных дорог всего мира, а повышение эффективности его функционирования признано одной из ключевых задач, указанных в документе «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [87]. При этом степень безопасности и эффективности его использования – существенный показатель уровня развития транспортного сообщения всей страны. Само существование и бесперебойное функционирование современных железнодорожных магистралей невозможно без высокоэффективной системы управления, повышению надежности которой отводится значительное внимание при модернизации существующих и проектировании новых железнодорожных участков. Одним из важных направлений в данной области является создание, разработка и проектирование различных защитных средств, методик и методов и, в частности, в сфере электромагнитных воздействий.

Сети тягового электроснабжения являются основным источником негативных влияний, порождаемых железными дорогами. Их воздействию подвергаются абсолютно все металлические объекты, расположенные вдоль железных дорог, такие как направляющие линии устройств управления. Подобные воздействия вызывают деструктивные процессы, которые могут повредить дорогостоящее оборудование и стать причиной железнодорожной аварии или даже повлечь за собой гибель людей.

Предотвращение подобных происшествий является главной целью для исследователей, разрабатывающих средства осуществления электромагнитной совместимости в сфере железнодорожного транспорта. Данный факт в свою очередь подчеркивает актуальность вопросов создания средств защиты компонентов транспортных электротехнических комплексов от наводимых перенапряжений.

Особая перспективность исследований электромагнитной совместимости просматривается на фоне современных разработок в области высокоскоростного транспорта будущего с применением технологий магнитного подвеса, а также повышенного интереса транспортных корпораций мира к развитию в данных направлениях.

Степень разработанности темы исследования. В области электромагнитной совместимости электрифицированных железных дорог со смежными системами исследования проводились различными Российскими и зарубежными учеными, такими как: В.М. Артюшенко, Н.В. Беянина, А.В. Воронин, В.И. Гаврилюк, И.В. Жежеленко, Е.Э. Закиев, А.М. Ковынцев, В.А. Корчагин, И.А. Костюков, В.В. Мелешко, О.Н. Назаров, А.А. Наумов, Н.Б. Никифорова, В.А. Осипов, А.П. Петровичев, Г.Г. Пивняк, Уайт Дональд Р. Ж., Э. Хабигер, В.И. Шаманов, А.К. Шидловский, В.И. Щека и др.

Вопросы синхронизации в своих трудах рассматривали: А.В. Бернов, И.И. Блехман, Ю. Куртс, А.А. Ляховкин, А. Пиковский, М. Розенблюм, С.М. Сухман, В.В. Шахгильдян, Б.В. Шевкопляс и др.

Явлением самоорганизации занимались: А.Н. Гуда, В.Н. Иванченко, Е.Н. Кирпач, Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов, Н.Н. Лябах, Г. Николис, В.Н. Таран, М. Эйген и др.

В области тяги поездов и электрификации значительный вклад внесли: Б.М. Бородулин, А.Л. Быкадоров, И.В. Волков, Е.В. Горенбейн, Ю.И. Жарков, О.В. Залесова, А.А. Зарифьян, Р.Н. Карякин, П.Г. Колпахчян, К.Г. Марквардт, В.Н. Носков, В.А. Осипов, А.Д. Петрушин, П.И. Прокопчук, М.Ю. Пустоветов, В.А. Соломин, А.В. Соломин, Е.П. Фигурнов, Н.С. Флегонтов и др.

Разработке систем и устройств защиты, а также повышению безопасности перевозочного процесса посвятили свои работы: Н.В. Гудкова, И.Д. Долгий, Е.А. Жебрун, В.Н. Иванченко, Т.П. Каминская, С.М. Ковалев, В.И. Колесников, А.Г. Кулькин, М.Р. Найфельд, В.Г. Недорезов, В.А. Соломин, Н.А. Чернявская, F. Faghihi, B. Pishgahzadeh, S. Soleymani, A. Tsaliovich и др.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение работоспособности компонентов системы управления транспортным электротехническим комплексом при внешних электромагнитных воздействиях.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Произведена оценка степени электромагнитного воздействия тяговых сетей на кабельную линию управления в рамках строгой постановки задачи электромагнитного анализа на основе уравнений Максвелла с учетом различных сред и граничных условий.

2. Проведена экспериментальная оценка уровней электромагнитного воздействия электрифицированных железных дорог на кабельные линии управления, хорошо коррелирующая с результатами теоретического анализа.

3. Рассмотрены следствия внешних электромагнитных воздействий на цифровые каналы управления электротехнических комплексов и предложен метод повышения их работоспособности.

4. Разработан математический аппарат статистического анализа электромагнитных воздействий и выполнен синтез на его основе устройств, направленных на повышение безопасности и работоспособности компонентов электротехнического комплекса.

5. Осуществлено аналитическое обоснование возможности снижения индуктированных токов путем использования противотоков, предложена структура и алгоритм функционирования системы защиты линий управления транспортным электротехническим комплексом.

Объектом исследования являются компоненты, обеспечивающие безопасность и работоспособность, электротехнических комплексов и систем.

Предмет исследования – устройства уменьшения внешних электромагнитных воздействий на компоненты электротехнических комплексов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показан механизм воздействия системы тягового электроснабжения на кабельную линию управления с учетом сложных граничных условий и структуры

железнодорожного пути на основе строгих методов математического моделирования электромагнитных полей.

2. Предложена система компенсации токов, индуктированных в кабельных линиях управления, и обоснованы способы ее применения.

3. Обоснована возможность использования явления самоорганизации для повышения работоспособности системы синхронизации цифровых средств управления компонентами электротехнических комплексов.

4. Выполнена статистическая обработка результатов измерений электромагнитных внешних воздействий на кабельную линию управления электротехническим комплексом, отличающаяся от известных одновременным оцениванием функции распределения и ее плотности, при учете естественных требований к соответствующим функциям.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Выполнено математическое моделирование компонентов транспортного электротехнического комплекса, позволяющее исследовать закономерности передачи и использования электрической энергии в соответствии с фундаментальными законами и определять, как токораспределение во влияющих проводниках, так и уровни индуктированных в оболочке кабельной линии управления токов с учетом различных сред и граничных условий. Результаты использованы в учебном процессе в ВУЗе при подготовке специалистов для железнодорожного транспорта.

2. Произведены измерения индуктированных токов на оболочках кабельных линий управления компонентами электротехнических комплексов и их обработка в соответствии с разработанной теорией согласованной оценки плотности и функции распределения, которые позволяют определить порог срабатывания системы компенсации индуктированных токов. Разработанная программа реализации алгоритма оценки подтверждена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3. Материалы исследований в части технических предложений по защите устройств электротехнических систем на основе статистических исследований опасных и мешающих напряжений и индуктированных токов использованы в научных разработках ОАО «НИИАС», договор №86/1501, что подтверждается актом об использовании результатов диссертационной работы.

4. Разработан алгоритм определения ядра линейной системы формирования противотоков на основе использования статистических данных о индуктированных токах и минимизации функционала среднеквадратического отклонения.

Методология и методы исследования. Методология диссертационного исследования в значительной степени является естественным следствием развития научной мысли многих отечественных и зарубежных ученых в области электротехнических комплексов и их работоспособности при внешних электромагнитных воздействиях.

В работе использованы теоретические методы, включающие инструментарий статистической обработки, метод конечных элементов, оптимальных решений, функционального анализа, теории вероятности, а также экспериментальные методы прямых и косвенных измерений и математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель электромагнитного взаимодействия и экспериментальная оценка внешних электромагнитных воздействий на компоненты систем управления транспортного электротехнического комплекса.

2. Алгоритм согласованной оценки плотности вероятности и функции распределения существенных параметров внешних электромагнитных воздействий, индуктированных на кабельную линию управления электротехническим комплексом.

3. Эффект самоорганизации кластера генераторов фазовой автоподстройки, структурная схема и результаты натурного моделирования.

4. Схемное решение и алгоритм функционирования системы компенсации токов, индуктированных в кабельных линиях управления.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается:

– удовлетворительным совпадением теоретических положений, результатов моделирования и экспериментальной оценки между собой и с работами других исследователей;

– плотность вероятности и функция распределения согласованы между собой и удовлетворяют стандартным требованиям нормировки и положительности;

– эффект самоорганизации подтвержден натурным экспериментом взаимной синхронизации группы связанных генераторов гармонических колебаний с фазовой автоподстройкой частоты;

– принципиальная реализуемость предлагаемой системы компенсации токов, индуктированных в кабельных линиях управления транспортных электротехнических комплексов подтверждена модельным примером.

Апробация результатов. Основные положения и результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на 23 конференциях: всероссийских и международных научно-практических конференциях «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, 2008-2016, 2018, 2020-2022 гг.); международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство» (Ростов-на-Дону, 2009); седьмой международной научно-практической конференции «Телекоммуникационные, информационные и логистические технологии на транспорте» (ТелекомТранс–2010) (Ростов-на-Дону, 2010); второй международной молодежной научно-практической конференции СКФ МТУСИ «Инфоком-2012» (Ростов-на-Дону, 2012); международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (Ростов-на-Дону, 2014); всероссийской научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» (Наука-2017) (Ростов-на-Дону, 2017); 3-ей международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ИТИ-2018) (Сочи, 2018); международной научно-практической

конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (ТрансПромЭк-2019) (Ростов-на-Дону, 2019); международной научно-технической конференции "Автоматизация" (RusAutoCon-2021) (Сочи, 2021); международной научно-практической конференции "Цифровые инфокоммуникационные технологии" (Ростов-на-Дону, 2021); всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (Ростов-на-Дону, 2022), а также на Одиннадцатом Всероссийском конкурсе научных работ среди студентов и аспирантов по транспортной проблематике (Москва, 2023).

Результаты диссертационного исследования использовались в проекте №301248-0-00 «Оборудование объекта связи устройствами защиты на станции Белореченская Северо-Кавказской железной дороги», докладывались на совещании службы технической политики Северо-Кавказской железной дороги, используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» и прошли апробацию в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Ростовской области».

1 ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ

1.1 Обзор современных методов общей теории электротехнических комплексов

На современном этапе в рамки исследований, направленных на повышение надежности и эффективности использования подвижного состава с точки зрения электромагнитной совместимости электрифицированных железных дорог со смежными системами автоблокировки, телемеханики и связи, попадают научные работы по некоторым смежным направлениям.

Вопросам оценки надежности электротехнических комплексов, в частности, подсистем автоматики и телемеханики посвящена работа [16]. В ней рассмотрены показатели технологической эффективности этих систем. Автор на базе существующих статистических знаний в данных вопросах выполнил значительную работу по их анализу и систематизации. После чего предложил метод прогнозирования остаточных ресурсов устройств автоматики и телемеханики. Но, к сожалению, не были исследованы варианты возможной модернизации с целью повышения надежности и увеличения сроков эксплуатации.

Учеными большое внимание уделяется вопросам применения комплексов автоматики и телемеханики, осуществляющих интервальное регулирование, с целью обеспечения безопасности движения поездов [6, 7, 9, 27, 30, 56, 78, 80]. В основе таких комплексов лежат устройства, непосредственно связанные с рельсовыми цепями. На их работу оказывает мешающее и опасное воздействие обратный тяговый ток, который может стать причиной нарушения работоспособности в следствии сильной гальванической связи [3, 4, 5, 17, 49, 100, 109]. Эти вопросы также относятся к проблемам электромагнитной совместимости, в частности рельсовых цепей и электроподвижного состава (ЭПС). Обострение ситуации в данной области произошло с внедрением асинхронных тяговых приводов, которые при изменении скорости движения генерируют тяговый ток с гармониками в широком диапазоне частот. Из предлагаемых путей решения

данной проблемы в качестве наиболее эффективного признается ограничение величины генерируемых помех до нормативных уровней [18, 19, 20, 66].

Таким образом можно отметить значительную проработанность вопросов по защите путевых устройств автоматики и телемеханики от влияния обратного тягового тока как гальванической составляющей электромагнитной совместимости. Однако, хочется отметить явное отсутствие в рассмотренных работах исследований в области электромагнитной совместимости кабельных линий подключения полевого оборудования к стационарному. При том, что неполадки при передаче данных могут фактически полностью нейтрализовать достигнутое повышение надежности работы всей системы.

Вопросы электромагнитной совместимости кабельных линий в настоящее время преимущественно рассматриваются относительно повышения эффективности, надежности и снижения энергопотерь при использовании силовых кабелей высокого напряжения [8, 25, 26, 33, 44, 45, 46, 60, 97]. Цели данных исследований лежат в смежной области интересов, а сами линии по сути являются одним из источников негативных влияний на кабельные линии автоматики, телемеханики и связи, но не основным. Как следствие, модернизация силовых линий опосредованно влияет на общее улучшение электромагнитной обстановки вокруг телекоммуникационных линий, но вносимые изменения не обеспечивают достаточного повышения защищенности линий телекоммуникаций, находящихся под влиянием сетей электроснабжения железнодорожного транспорта.

На ряду с этим, применяемые в настоящий момент средства защиты линий автоматики, телемеханики и связи преимущественно разрабатывались для более благоприятных условий в электромагнитной обстановки и не подвергались значительной модернизации. За прошедшее время фактические требования к системам защиты кабельных линий от внешних электромагнитных влияний значительно возросли. И даже несмотря на заложенный при разработке таких систем технологический запас, в настоящее время остается значительная вероятность событий, которые могут привести к потере или ошибочному восприятию сигналов, к выходу из строя оборудования или даже к поражению

обслуживающего персонала электрическим током. Таким образом сложившаяся ситуация демонстрирует необходимость проведения дополнительных исследований с целью поиска и выявления оптимальных методов и путей модернизации, способных обеспечить повышение эффективности защиты до необходимого уровня.

Одним из эффективных используемых методов защиты смежных линий является применение заземлителей. Весомый вклад в развитие современной теории применения заземлений произвели отечественные [10, 23, 31, 42, 48, 105, 106, 107] и многие иностранные ученые [121, 131].

В смежных областях науки и техники известна и хорошо зарекомендовала себя система активного шумоподавления [70]. Ее варианты применяются в целом ряде технических устройств от аудиоустройств и оргтехники до транспортных средств, вплоть до космических кораблей. Данные системы применяются для подавления нежелательных звуков путем генерации акустических волн, излучаемых в противофазе к измеряемому. Целью подавления является полное или же максимально-возможное снижение уровня звука до некоторого приемлемого уровня. Однако, в настоящий момент нет реализации подобных систем для сигналов электромагнитного спектра. Тем ни менее на железнодорожном транспорте, и в других отраслях, известна и используется активная катодная защита подземных сооружений от коррозии. Она также использует принцип внешнего воздействия для осуществления защиты, но борется не с протекающим током и его воздействием на передаваемые сигналы, а последствиями его протекания в виде разрушения металлических оболочек.

В зарубежных публикациях вопросам электромагнитной совместимости также уделяется большое внимание. Так Hill R.J. с коллегами [122] разработали модели для железнодорожных линий, запитываемых тяговыми токами низкой частоты для того, чтобы глубже проникнуть в суть проблемы и предложить эффективные методы их решения. Центр тяжести в их работе заключался в определении токов, протекающих между рельсами и землей, которые очень часто

могут затекать по гальваническим связям в смежно расположенные линии электропередачи (ЛЭП).

Расчеты, проведенные на основе методов конечных элементов, позволяют более обоснованно и качественно производить проектирование оборудования систем сигнализации и связи [112, 113, 114, 115, 119, 123].

Результаты теоретических расчетов, основанные на интегральном представлении связи между токами и напряжениями по уравнениям теории Карсона были экспериментально подтверждены для токов низких частот и опубликованы в работах [114] и [119].

Данные исследования сложно пролонгировать на более высокие частоты, а современное состояние в вопросах электромагнитной совместимости требует рассмотрения в более широком диапазоне частот потому, что существует проблема, вызванная ударами молнии, а также дугообразованием на пантографе, которые приводят к появлению широкополосных шумов.

В работе [117] рассмотрена и доказана важность изучения вопросов электромагнитной совместимости железнодорожной инфраструктуры и систем. Также в [117] и [127] затронуты проблемы сложности учета переходных процессов в системах тягового электроснабжения, комбинирующих сети с различными напряжениями и частотами питания, и использующими электронные преобразователи на локомотивах. При том, что подобные комбинированные системы питания широко применяются в странах Европы и возможность работы в таких сетях является одним из требований к подвижному составу. На ряду с этим существуют требования к скорости переключения с одной питающей сети на другую, которые составляют наносекунды [124]. Так как в процессе переключений происходит генерация кратковременных, но сильных электромагнитных импульсов в широком диапазоне частот, которые передаваясь по тяговым сетям оказывают влияния на смежные устройства даже в нескольких километрах от источника. Для уменьшения силы их воздействия в тяговую сеть внедряют каскады реактивных узкополосных фильтров. Однако, эти и другие средства не дают абсолютной защиты системам автоматики, телемеханики и связи [124, 125].

1.2 Методы защиты от наводимых воздействий

1.2.1 Общие тенденции развития электромагнитной совместимости компонентов электротехнических комплексов.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) устройств управления, телекоммуникаций и электрифицированных железных дорог переменного тока является одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность эксплуатации подвижного состава. В частности, от качества, надежности и оперативности работы этих систем зависят возможная скорость и интенсивность движения на железнодорожном участке. Соответственно, при улучшении функционирования систем обеспечения движения поездов достигается необходимый эффект повышения эффективности использования подвижного состава.

Так, например, системы аналоговой радиосвязи ограничивают скорость движения железнодорожного транспорта в пределах порядка 100 км/час. На больших скоростях работе систем аналоговой радиосвязи мешает возникновение эффекта Доплера. Внедрение же цифровых систем подвижной связи, устойчивых к данному эффекту, позволяет повысить это ограничение. Ярким примером служит внедрение системы GSM-R на участке Туапсе – Альпика-Сервис в 2014 году, которое дало возможность реализовать скоростное движение на всем участке.

В развернутом виде и более обоснованно стратегия перспективной модернизации железнодорожного транспорта, в том числе и в сфере высокоскоростных линий, используемых для перевозок со скоростью до 350 км/час, сформулирована в [87].

С другой стороны, увеличение интенсивности и грузонапряженности перевозок становится причиной повышенных уровней электромагнитных излучений со стороны тяговых сетей. Под их действием усложняется функционирование систем обеспечения безопасности движения поездов. Это проявляется в повышенных уровнях помех, возрастании количества ошибок и даже может послужить причиной выхода из строя оборудования. Таким образом

системы защиты от электромагнитных влияний также вынуждены развиваться и решать все более сложные задачи.

В перспективах развития железнодорожного транспорта лежит глобальный переход к высокоскоростному движению и, в дальнейшем, к сверхскоростному. Уже в настоящий момент известно множество примеров внедрения высокоскоростного движения во всем мире. Системы сверхскоростного движения находятся на этапе разработки. К ним можно отнести такие проекты как Маглев, Hyperloop и SkyWay. Все эти системы будут являться источниками сильных электромагнитных влияний, ввиду скоростей и, следовательно, повышенных энергозатрат.

Таким образом вопросы повышения ЭМС электрифицированных железных дорог и смежных систем управления и телекоммуникаций являются и будут актуальны.

Применяемые в настоящее время методы и средства обеспечения ЭМС разрабатывались без учета столь высоких уровней влияний и, следовательно, не в полной мере смогут обеспечить надежность функционирования систем обеспечения движения поездов и не будут отвечать всем требованиям безопасности движения.

Следовательно, существует необходимость разработки современных методов, систем и средств защиты от повышенных уровней наводимых влияний. На ряду с этим снижение частоты аварий является приоритетной задачей для всех разрабатываемых методов обеспечения ЭМС железных дорог, смежных систем и компонентов электротехнических комплексов железнодорожного транспорта, а также средств защиты кабельных линий от наводимых перенапряжений.

Традиционные пути защиты от внешних влияний подразделяются на способы снижения силы излучения в источнике или уменьшения влияния непосредственно в защищаемом объекте.

Так как источниками электромагнитного воздействия со стороны электрифицированных железных дорог в первую очередь выступают тяговые сети, то методы уменьшения их силы воздействия в своей основе весьма сложны и часто

требуют значительных капитальных вложений. При этом переоборудование существующих участков может быть равносильно постройке их заново. Тем не менее подобные методы дают значительное улучшение электромагнитной обстановки на участке. В некоторых случаях, как например в системе с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП), наводимые влияния на участке после модернизации снижаются практически в два раза относительно системы питания на 27,5 кВ [65].

Методы уменьшения наводимых влияний непосредственно в защищаемом объекте более разнообразны.

1.2.2 Разнос.

Исходя из природы электромагнитных влияний, первым способом защиты от электромагнитных влияний стало увеличение расстояния от источника излучения.

Электрические поля, генерируемые ЛЭП, а также линиями тягового электроснабжения носят характерный вид, показанный на рисунке 1.1.

По рисунку 1.1 видно, что в районе расположения несущих токопроводов напряженность электрического поля достигает наибольших значений, затем к расстоянию примерно в 10 метров от проводов идет существенный спад, а затем значение градиента поля уменьшается не по экспоненциальному закону, как следовало бы ожидать из общих соображений.

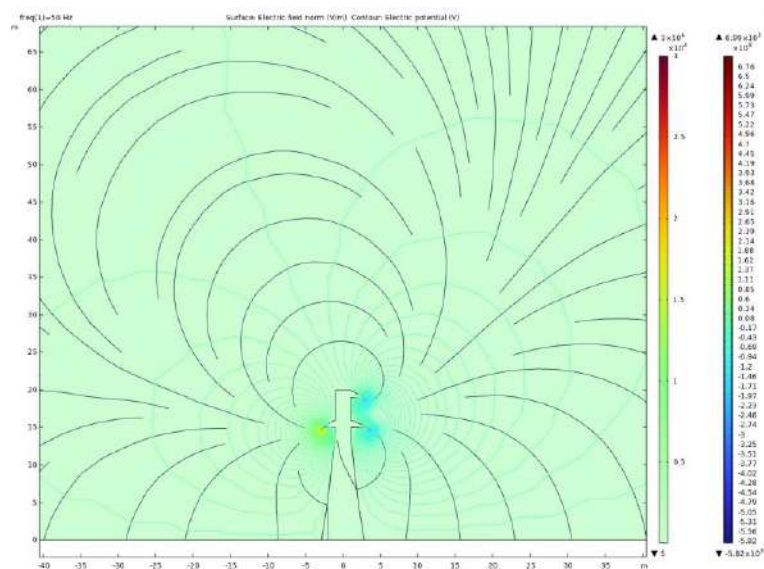


Рисунок 1.1 – Расчетное электрическое поле ЛЭП 35 кВ

Отсюда можно сделать заключение, что для достаточного снижения электрической составляющей наводок на кабели их следует размещать на расстоянии более чем 30 метров. Причем магнитные составляющие поля имеют градиент в несколько раз меньший, чем у электрических полей. Поэтому их влияние имеет достаточное значение на расстояниях более чем 100 метров. Соответственно можно сделать заключение, что возможности уменьшения влияния электрических и магнитных полей за счет разнесения кабелей на большие расстояния ограничены, поскольку полоса отвода железной дороги обычно составляет порядка 10 метров [74].

Для случаев подземного размещения смежных линий при практических расчетах влиянием электрической составляющей пренебрегают.

Из соответствующих расчетов и экспериментальных данных следует, что магнитное влияние на кабельные линии является определяющим фактором и поэтому им пренебрегать нельзя ни при каких удалениях от источника магнитного поля. Таким образом метод защиты линий от влияний электрических и магнитных полей путем удаления от источника является малоэффективным, а неуклонное увеличение интенсивности излучений и отсутствие возможности для значительного пространственного разнесения усложняют эту задачу. К тому же данный метод практически не применим к современным меднокабельным телекоммуникационным линиям, так как они конструктивно располагаются в непосредственной близости к железнодорожному полотну практически на всей протяженности железных дорог и отнес их возможен лишь в пределах полосы отвода.

1.2.3 Защита заземлением, грозозащита, разрядники, предохранители, дренажные катушки.

Для уменьшения величины наводимых на кабельную линию магнитных влияний часто принято использовать метод секционирования защитной оболочки установкой заземлений. Более подробное рассмотрение метода защиты путем заземления [52] показывает, что токи, наводимые за счет магнитных полей, действительно уменьшаются, поскольку добавляемые заземления разбивают

линию на независимые контура меньшего размера. При этом возникает, казалось бы, простое решение – чем чаще устанавливаются заземления, тем меньше величина наводимых токов в оболочке кабеля.

Однако, третьим фактором наводимых влияний являются гальванические токи, возникающие в результате затекания обратного тягового тока в смежные линии, имеющие минимум два гальванических соединения с землей. Чем чаще установлены заземления, тем больше точек для затекания гальванических токов и соответственно сильнее влияние этой составляющей.

Совсем отказаться от заземлений оболочек кабельных линий не представляется возможным еще и в следствии природных источников электромагнитных влияний, таких как молнии. Территория распространения железнодорожного транспорта захватывает регионы с различными интенсивностями возникновения грозových разрядов. При этом линии связи также попадают под их влияния. Для защиты линий от токов перенапряжений, порождаемых разрядами молний, используются специализированные заземлители – грозозащиты, а вблизи зданий кабель попадает под дополнительную защиту молниеотводов.

Как правило молниезащита представляет собой сложное техническое сооружение, представляющее собой высокую мачту (1) (рисунок 1.2), выполненную из металлических конструкций, оканчивающаяся тонким штырем (2), для создания зоны высокой концентрации напряженности поля, в результате чего молния устремляется к этому штырю и далее по токопроводящим материалам мачты к заземленным элементам (3).

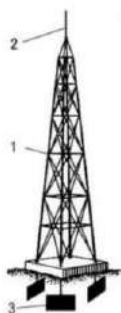


Рисунок 1.2 – Мачта молниезащиты

Как известно, в классическом представлении зона в которой одиночный молниеотвод обеспечивает должную защиту имеет форму конуса с высотой h_0 не превышающей высоту h штыря молниеотвода. Она представлена на рисунке 1.3. Если принять величину защитной зоны как $h_0 = 0,92 \cdot h$, то конус в основании будет иметь круг радиусом $r_0 = 1,5 \cdot h$. Когда же необходимо определить радиус защиты на определенной высоте h_x , то используют выражение

$$r_x = 1,5(h - h_x / 0,92).$$

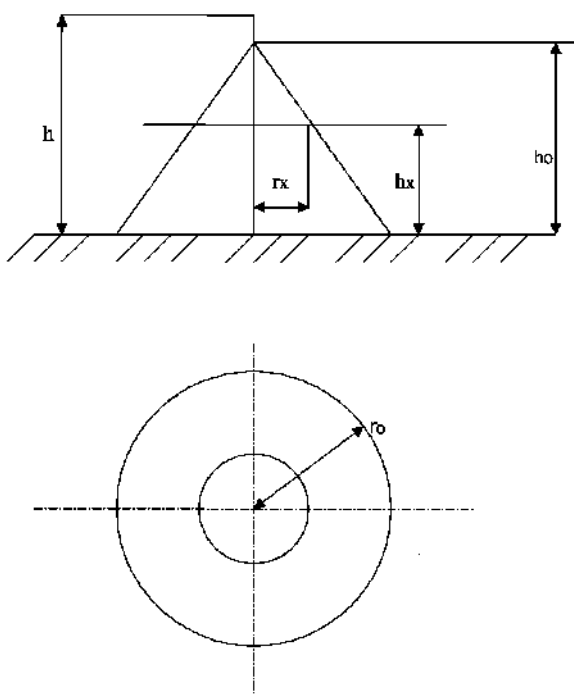


Рисунок 1.3 – Область действия молниезащиты

Результат моделирования электростатического поля, порождаемого грозовым облаком, вокруг одиночного заземлителя молниезащиты представлен на рисунке 1.4 [89]. Цифрой 1 обозначен непосредственно одиночный молниеотвод, под 2, 3 и 4 обозначены эквипотенциальные уровни 12,4 В, 124,02 В и 248,04 В соответственно.

Как видно по рисунку 1.4 фактическая область эффективной защиты может существенно отличаться от классического конусоидального представления.

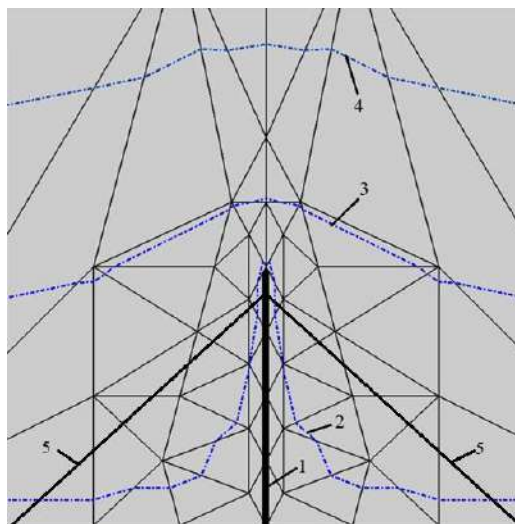
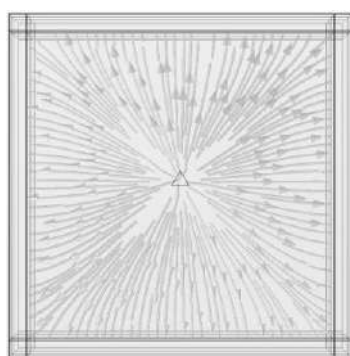


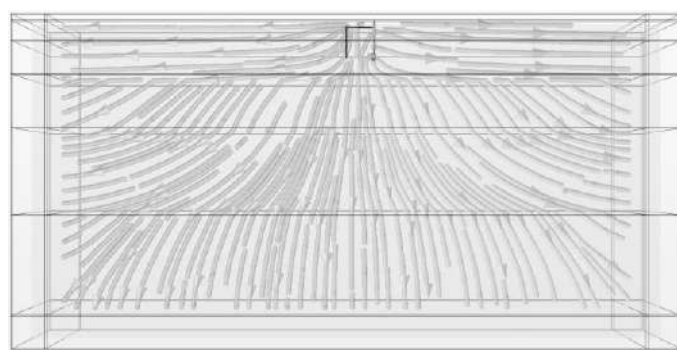
Рисунок 1.4 – Результат моделирования молниезащиты

При этом эффективность заземлений, а значит и молниезащиты, может существенно варьироваться от структуры слоев толщи земли.

На рисунке 1.5 представлены результаты моделирования [12] путей растекания токов в земле от трехштырьевого заземлителя при наличии слоев с разным удельным сопротивлением.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Схема растекания в грунте: а – вид сверху; б – вид с боку

В рамках исследования также были произведены расчеты сопротивления заземляющего устройства при изменениях проводимости отдельных слоев грунта. Моделируемые параметры слоев грунта приведены в таблице 1.1, а результаты вычисления сопротивлений представлены в графическом виде на рисунке 1.6.

Таблица 1.1 – Параметры слоев грунта

№ слоя	Вид грунта	Толщина слоя, м	Удельное сопротивление грунта ρ , Ом·м		
			Наихудшие	Наилучшие	Рекомендуемое расчетное
1	Земля	1	40	5	40
2	Суглинок	3	150	40	100
3	Глина	5	70	8	40
4	Песок	8	1000	400	700
5	Супесок	13	400	150	300
6	Известняк	20	2000	1000	1500

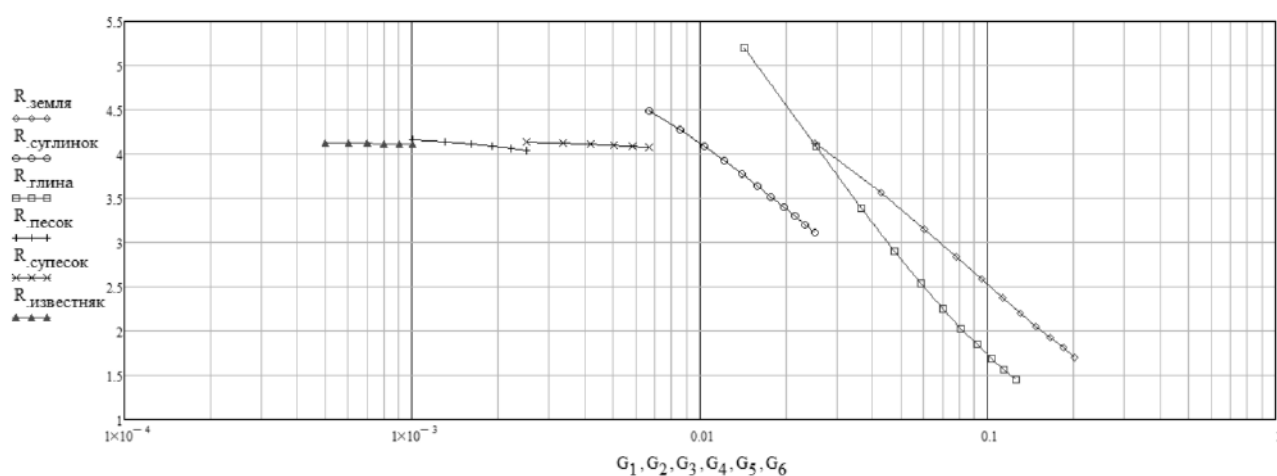


Рисунок 1.6 – Зависимости сопротивлений заземлителя от проводимости слоёв грунта

По рисунку 1.6 видно, что для моделируемого примера изменение параметра проводимости для слоев глины, суглинка и земли оказывает существенное влияние на результирующее сопротивление заземления.

Для граничных значений параметров получены следующие сопротивления заземления:

- при наихудших условиях – 5,8943 Ом;
- при наилучших условиях – 0,85 Ом;
- при рекомендуемых расчетных условиях – 4,1212 Ом.

Между тем влияние молнии заключается не только в прямом протекании тока при разряде, но и возникновении сильных электрических и магнитных полей, в соответствии с законами Максвелла, наводящие токи перенапряжения в

близкорасположенных линиях. Для защиты от значительных перенапряжений вводно-кабельные устройства оборудуются грозоразрядными устройствами, снимающими наведенные молнией токи с оболочек или отдельных жил подводимых кабелей. При наличии нескольких разрядников в одной системе может произойти их одновременное срабатывание, которое вызовет практически полное замыкание сигнальных цепей, приводящее к шумам, сбоям или обрыву связи. Для снижения влияния таких замыканий в цепи разрядных устройств включают дренажные катушки на общем сердечнике. Наличие магнитной взаимосвязи между катушками ограничивает возможность протекания сквозь себя противофазных сигнальных токов, но не препятствует протеканию токов наводок.

Также для защиты оборудования от перенапряжений, наведенных непосредственно в жилах, применяются различные предохранители, разрывающие цепь при протекании по ним токов, не вызывающих срабатывания разрядников, но опасных для защищаемых устройств.

Однако, даже такие системы защиты не могут обеспечить должной надежности электротехническим комплексам и их компонентам.

Одним из важных недостатков предохранителей является их невосстанавливаемость, которая приводит к значительным перерывам функционирования защищаемых систем в период между срабатыванием предохранителя и его физической заменой.

Таким образом, более предпочтительным решением подобных проблем является недопущение ситуации срабатывания предохранителей.

1.2.4 Кабели, оболочки, экранирования.

Как видно из предыдущей части, системы защиты должны не только не допустить выхода из строя оборудования, но и максимально снизить частоту перерывов функционирования, связанных с возникновением критических ситуаций.

Наиболее логичным выходом в решении данных задач является снижение величины наводимых влияний от рассмотренных факторов. Классически для снижения воздействий применяются два подхода:

- снижение величины влияний, порождаемых источниками;
- снижение величины влияний, наводимых на защищаемый объект.

В обоих случаях могут быть применены системы экранирования. Как известно любой протяженный металлический объект может служить в качестве экранирующего устройства, ярким примером такого объекта на железных дорогах являются рельсы. В результате протекающих по ним токов создаются собственные электромагнитные поля, которые в некоторой степени компенсируют силу воздействия системы тягового электроснабжения на прочие элементы или даже перебивают ее по мощности. Другим значимым примером может служить используемый в некоторых системах электроснабжения специальный экранирующий провод. Он размещается на контактной опоре и своим электромагнитным полем снижает общий уровень негативных излучений.

Когда нет возможности снизить силу влияния в источнике применяют местное экранирование важных элементов. При этом в качестве экранов могут использоваться металлические щиты, дополнительные проводники, броня и другие металлические покровы самого кабеля или даже клетка Фарадея. Для повышения эффективности действия экранов их, обычно, размещают на всем протяжении защищаемого кабеля и дополнительно заземляют.

Внешний вид кабеля марки МКПпАБпШп приведен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Кабель марки МКПпАБпШп, производства ЗАО «Самарская кабельная компания»

Конструкция такого кабеля предусматривает наличие сварной алюминиевой трубки и бронепокрова из двух стальных лент. Наличие данных защитных оболочек обеспечивает идеальный коэффициент защитного действия (КЗД) не

более 0,1 / 0,02 при продольной ЭДС от 50 до 300 В/км на частотах 50 / 800 Гц. В то время как для аналогичного кабеля марки МКПпАШп, не имеющего металлического бронепокрова, данный КЗД будет не более 0,4 / 0,04 при прочих равных условиях измерения [76].

Таким образом на защищенность кабелей непосредственно влияют множество различных факторов, таких как материал проводников и оболочек, расположение, окружающие элементы, их конструкции и материалы, наличие или отсутствие экранирующих устройств, их форма и материал [47].

1.3 Математический аппарат и методы

1.3.1 В основу диссертационного исследования положен классический математический аппарат, основанный на уравнениях в частных производных, которыми описываются электромагнитные поля, в частности уравнения Максвелла.

При этом широко используются такие понятия, как линейные пространства, система ортогональных векторов, операторы, функционалы и их производные. Переходя от одного линейного пространства к другому, иногда удается существенно упростить задачу.

В проблеме ЭМС существенную роль играют случайные процессы и величины. Поэтому для более конструктивного анализа используются основные положения теории вероятностей, такие как случайная величина, математическое ожидание, дисперсия, функция распределения, плотность вероятности, корреляционная функция и т.д.

1.3.2 Исследование процессов электромагнитного взаимодействия сложных систем сталкивается с трудностями математического описания реальных явлений. Так электромагнитные влияния по своему характеру близки к марковскому процессу, который описывается условной плотностью распределения.

Рассмотрим концепцию белого шума, которая основана на независимости двух значений этого процесса в любые сколь угодно близкие друг к другу значения

момента времени. Поэтому корреляционная функция белого шума имеет вид дельта-функции $\delta(t)$. Опираясь на это представление, Винер представил марковский процесс $W(t)$ как интеграл от белого шума $n(t)$. Формально эти выражения выглядят следующим образом

$$\frac{dW(t)}{dt} = n(t) \text{ или } W(t) = \int_0^t n(t)dt. \quad (1.1)$$

Учитывая, что математическое ожидание от белого шума равно нулю, корреляционную функцию определяем следующим образом

$$M[n(t) \cdot n(\tau)] = \frac{N_0}{2} \cdot \delta(t - \tau), \quad (1.2)$$

где N_0 – спектральная плотность белого шума.

Основываясь на (1.1) видно, что дисперсия винеровского процесса имеет линейную зависимость от времени t . Действительно,

$$M[W^2(t)] = \int_0^t \int_0^t M[n(t) n(\tau)] dt d\tau, \quad (1.3)$$

откуда, учитывая (1.2) и фильтрующее свойство дельта-функции, получаем

$$M[W^2(t)] = \frac{N_0}{2} t, \quad (1.4)$$

а среднеквадратическое отклонение пропорционально \sqrt{t} . Отсюда следуют весьма необычные свойства винеровского процесса, а именно его непрерывность в каждой точке и одновременно недифференцируемость.

Важно подчеркнуть, что, на основании указанных выше свойств винеровского процесса, все дифференциальные уравнения в которых в явном виде присутствует винеровский процесс должны содержать дифференциал времени и дифференциал приращения винеровского процесса

$$d\lambda = f(t, \lambda)dt + g(t, \lambda)dW(t), \quad \lambda(t_0) = \lambda_0, \quad (1.5)$$

где $f(t, \lambda)$ – регулярная составляющая, обычно называемая сносом;

$g(t, \lambda)$ – функция, которую обычно называют диффузной составляющей.

В следствии особых свойств винеровского процесса, заключающихся в том, что сумма квадратов приращений винеровского процесса S_m определяемая выражением

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} S_m = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{m-1} [W(t_{i+1}) - W(t_i)]^2 = \frac{N_0(t - t_0)}{2}, \quad (1.6)$$

является неслучайной величиной, хотя сами приращения ΔW случайны.

В выражении (1.6) принято следующее разбиение оси времени $t_0 < t_1 < \dots < t_m < t$, а приращение определяется как $\Delta = \max_i(t_{i+1} - t_i)$.

Кроме того, предел этой суммы понимается в смысле сходимости по вероятности, в соответствии с [96].

Поэтому при вычислении интеграла вида

$$J = \int_{t_0}^t W(t) dW(t) = \frac{[W^2(t) - W^2(t_0)]}{2} - \frac{N_0(t - t_0)}{2}, \quad (1.7)$$

появляется дополнительное слагаемое пропорциональное разности времен.

Эти особенности винеровского процесса необходимо учитывать при анализе блоков автоподстройки частоты и фазы в системах автоблокировки, телемеханики и связи и других систем обеспечения безопасности движения поездов, где присутствуют шумы в широком диапазоне частот.

1.3.3 Часто, при математическом моделировании наводимых влияний, более удобным является раздельное описание системы взаимодействий от каждого отдельного источника в виде некоторых функций $f_i(t)$. Тогда рассматривая всю систему с точки зрения суперпозиции множества случайных процессов результат представляется некоторым функционалом $\Phi[f_1(t), f_2(t), \dots, f_i(t)]$.

В классическом представлении под функционалом понимается обобщение функции, применяемое как комплексный показатель взаимодействия нескольких переменных. В роли переменных могут выступать, в том числе, отдельные функции или даже их группы.

Наиболее характерными видами функционалов являются такие виды ресурсов, которые имеют большое значение для проектирования, производства,

эксплуатации, утилизации и т.д. Например, наиболее часто функционалом является энергия, масса-топливо, время производства работ, надежность, срок эксплуатации, стоимость, расходы на обслуживание и т.д. Наиболее часто в системах связи функционал можно представить в виде:

$$\Phi[x(t)] = \int_{t_0}^{t_1} x^2(t) dt. \quad (1.8)$$

Данный функционал характеризует энергию сигнала. Помимо такого представления, обычно, в функционал входят не только значения функции $x(t)$, но и ее производная. В случае наличия нескольких переменных могут присутствовать некоторые весовые функции, указывающие на значимость соответствующих компонентов. Поскольку при проектировании стремятся достичь наилучших показателей какого-либо качества, то выбранному функционалу стараются придать максимальное или минимальное значение, в зависимости от смысла показателя. Например, затрачиваемую энергию стремятся минимизировать, а вероятность безотказной работы максимизировать. Если функционал удовлетворяет гладкости и дифференцируемости, то для достижения экстремального значения достаточно этот функционал продифференцировать и приравнять к нулю. Функция, при котором производная функционала качества равна нулю, будет являться точкой в гильбертовом пространстве предполагаемого экстремума. Производную функционала $\Phi[x(t)]$ будем определять следующим образом:

$$\frac{\delta\Phi[x(t)]}{\delta x(\tau)} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\Phi[x(t) + \delta x(t)] - \Phi[x(t)]}{\int_{\tau-\Delta t/2}^{\tau+\Delta t/2} \delta x(t) dt}, \quad (1.9)$$

где $\delta x(\tau)$ – игольчатая вариация функции $x(t)$, представлена на рисунке 1.8;

h – высота вариации $\delta x(\tau)$;

τ – точка в которой происходит варьирование функции;

Δt – интервал варьирования.

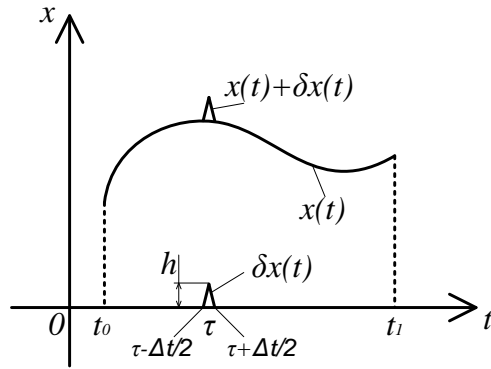


Рисунок 1.8 – Игольчатая вариация функции

Пример 1.1. Пусть функционал имеет вид скалярного произведения в гильбертовом пространстве двух функций:

$$\Phi[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)x(t)dt, \quad (1.10)$$

тогда функциональная производная будет равна

$$\frac{\delta\Phi[x(t)]}{\delta x(\tau)} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} u(t)(x(t) + \delta x(t))dt - \int_{-\infty}^{\infty} u(t)x(t)dt}{\int_{\tau-\Delta t/2}^{\tau+\Delta t/2} \delta x(t)dt}. \quad (1.11)$$

Раскрывая скобку в числителе правой части и учитывая теорему «о среднем значении» получаем

$$\frac{\delta\Phi[x(t)]}{\delta x(\tau)} = \frac{\int_{\tau-\Delta t/2}^{\tau+\Delta t/2} u(t)\delta x(t)dt}{\int_{\tau-\Delta t/2}^{\tau+\Delta t/2} \delta x(t)dt} = u(\tau). \quad (1.12)$$

Пример 1.2. Рассмотрим известное фильтрующее свойство дельта-функции:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t_0)\delta(t - t_0)dt_0. \quad (1.13)$$

Интерпретируем (1.13) как функционал, тогда функциональная производная, с учетом (1.12), будет иметь вид

$$\frac{\delta x(t)}{\delta x(t_0)} = \delta(t - t_0). \quad (1.14)$$

Пример 1.3. Пусть функционал $\Phi[x(t), \dot{x}(t)]$ будет зависеть от функции $x(t)$ и ее производной $\dot{x}(t)$, следующим образом

$$\Phi[x(t), \dot{x}(t)] = \int_{t_0}^{t_1} L(x(t), \dot{x}(t)) dt, \quad (1.15)$$

тогда функциональная производная

$$\frac{\delta\Phi[x(t), \dot{x}(t)]}{\delta x(\tau)} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\int_{t_0}^{t_1} L(x(t) + \delta x(t), \dot{x}(t) + \delta \dot{x}(t)) dt - \int_{t_0}^{t_1} L(x(t), \dot{x}(t)) dt}{\int_{\tau-\Delta t/2}^{\tau+\Delta t/2} \delta x(t) dt}. \quad (1.16)$$

Разложим в ряд слагаемое числителя

$$\begin{aligned} L(x(t) + \delta x(t), \dot{x}(t) + \delta \dot{x}(t)) &= L(x(t), \dot{x}(t)) + \frac{\partial L}{\partial x} \delta x(t) + \rightarrow \\ &\rightarrow + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \delta \dot{x}(t) + o(\delta x(t), \delta \dot{x}(t)), \end{aligned} \quad (1.17)$$

где $o(\dots)$ – бесконечно малые величины более высоких порядков.

После подстановки (1.17) в числитель (1.16) получаем следующее выражение для числителя

$$\int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{\partial L}{\partial x} \delta x(t) + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \delta \dot{x}(t) \right) dt. \quad (1.18)$$

После интегрирования второго слагаемого по частям получаем выражение

$$\int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{\partial L}{\partial x} \delta x(t) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \delta x(t) \right) dt = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \right) \delta x(t) dt. \quad (1.19)$$

Подставляем (1.19) в (1.16) и получаем окончательное выражение

$$\frac{\delta\Phi[x(t), \dot{x}(t)]}{\delta x(\tau)} = \frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right). \quad (1.20)$$

Приравняв его к нулю, получаем дифференциальное уравнение, решение которого дает экстремум функционала:

$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = 0. \quad (1.21)$$

Уравнение (1.21) является классическим уравнением Эйлера-Лагранжа [92].

1.4 Постановка задачи

Исходя из предыдущего анализа можно сделать вывод, что существующая система защиты компонентов электротехнического комплекса не в полной мере удовлетворяет требованиям к показателям надежности, предъявляемым к системам, отвечающим за обеспечение безопасности движения поездов.

Традиционные подходы к повышению безопасности в части уменьшения наводимых токов за счет включения дополнительных заземлений, разноса между силовыми линиями электропередачи и каналами передачи информации и другими методами снижения влияния не дают кардинального решения проблемы.

Требуется принципиально новый подход к снижению влияний на каналы передачи сигналов управления и информации, обеспечивающих безопасность движения поездов, основанный на сборе статистической информации относительно внешних воздействий, вскрытия механизмов влияния этих воздействий на приемные, передающие, формирующие блоки и узлы, составляющие линии и устройства телекоммуникаций и управления.

Предлагается разработать методы борьбы с влияниями, основанные на активном подавлении наведенных токов в периоды их интенсивного проявления. Методы борьбы с наведенными влияниями, основанные на активной защите, должны согласовываться и дополнять традиционные подходы.

Предлагаемые методы борьбы должны быть синтезированы с использованием современных программно-аппаратных средств и не требовать чрезмерных экономических инвестиций.

1.5 Рамки исследования

Будем рассматривать, что наведенные на кабельные линии влияния с достаточной степенью точности описываются уравнениями электродинамики. В зависимости от глубины проработки те или иные элементы электротехнического комплекса могут отсутствовать в предлагаемых решениях. Кроме того, сами

влияния будем считать по своей природе стохастическими в силу множества различных плохо контролируемых и прогнозируемых факторов. Поэтому описывать эти случайные процессы будем с точки зрения наиболее конструктивной теории к которым относятся марковские процессы.

Исследования производятся для наиболее критических случаев работы системы, которыми являются режимы короткого замыкания и вынужденный режим.

Спектральные характеристики наведенных токов указывают на наличие нелинейных эффектов, которые будем учитывать с использованием теории рядов Вольтера-Винера.

Будем считать, что наиболее уязвимым звеном в системе телекоммуникаций и управления является подсистема синхронизации.

1.6 Выводы по главе

1. С ростом интенсивности движения поездов и увеличения объемов грузоперевозок существенно усложняется проблема защиты компонентов электротехнических комплексов и систем поскольку помимо естественных факторов, таких как молнии, аварии на линиях энергоснабжения, возрастает количество передаваемой, потребляемой и излучаемой энергии.

Предлагаемые стандартные методы защиты от таких влияний не всегда обеспечивают требуемую степень надежности. Поэтому есть необходимость разработки методов активной защиты.

2. Используемый математический аппарат является не широко известным, однако адекватно отражает воздействие случайных шумов и помех на радиоэлектронные и другие компоненты транспортных комплексов и т.д. Для его использования требуются специализированные программы генерирования винеровских шумов и адаптации их под существующие измеряемые статистические токи.

3. Использование прямого метода вариационного поиска производных позволяет конструктивно и достаточно быстро находить экстремумы функционалов качества. Такой подход наикратчайшим образом позволяет находить оптимальные решения в классе допустимых алгоритмов.

4. Предложенные методы в сочетании с известными математическими приемами описания моделей электромагнитных взаимодействий дает возможность полномасштабного и в тоже время конструктивного проектирования устройств активной компенсации наводимых помех.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1 Сведение уравнений электромагнитного поля к модельным задачам

В основе теоретических построений основных параметров влияния электромагнитного излучения на оболочку кабеля положены следующие уравнения Максвелла [83]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

где \mathbf{H} – напряжённость магнитного поля;

\mathbf{j} – плотность электрического тока (тока проводимости);

\mathbf{D} – электрическая индукция;

\mathbf{E} – напряжённость электрического поля;

\mathbf{B} – магнитная индукция.

Оператор rot обозначает векторное произведение оператора набла ∇

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.2)$$

на соответствующий вектор.

Уравнения (2.1) необходимо дополнить материальными уравнениями, связывающими напряженности электромагнитного поля с векторами электрического и магнитного смещения (индукции):

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (2.3)$$

где ε_0 и μ_0 электрическая и магнитная постоянные.

В зависимости от среды действия электромагнитных полей относительные диэлектрические ε и магнитные μ проницаемости могут принимать различные значения. Так для воздуха они близки к единице. Относительная диэлектрическая проницаемость сред обычно лежит в пределах от единицы до сотни, а магнитная проницаемость, в зависимости от способности вещества к намагничиванию, может быть, как больше, так и меньше единицы.

Первое уравнение Максвелла представляет собой закон полного тока и при его использовании необходимо иметь граничные и начальные условия, в общем случае определяющиеся сложными некоординатными поверхностями.

Таковыми условиями описываются влияния сред на границах соприкасающихся элементов в расчетной области, а также взаимодействие с бесконечным пространством вокруг.

Из уравнений для электромагнитных полей (2.1) и (2.2), для частот близких к промышленной, с гармонической зависимостью от времени [67, 79] легко получить уравнение Гельмгольца, в общем виде представляющее следующее векторное уравнение:

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = f, \quad (2.4)$$

где Ψ – искомая функция, в общем случае 4х мерный потенциал поля [54], три компоненты этого вектора характеризуют магнитное поле и одна – электрическое;

f – выражение, описывающее наличие свободных зарядов в расчетной области;

k^2 – квадрат модуля волнового вектора:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (2.5)$$

Такой переход справедлив, когда ε и μ не зависят от протяженности [67].

При расчете электромагнитных полей электротехнических систем уравнение (2.4) часто дополняют однородным условием Неймана, определяющим значение нормальной производной на границе равным нулю, и граничным условием (ГУ) Дирихле. Последнее описывает априори известные значения искомой функции на границе области.

Учитывая, что k^2 для электротехнических комплексов, использующих промышленные частоты, принимает величину ничтожно малую ($\sim 10^{-12}$), то уравнение Гельмгольца вырождается в уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) = f(x, y, z), \quad (2.6)$$

а в случае отсутствия в расчетной области источников, т.е. $f(x, y, z) = 0$, в уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) = 0. \quad (2.7)$$

Уравнения Пуассона и Лапласа также дополняются граничными и начальными условиями Неймана или Дирихле.

Для решения задачи распределения электромагнитного поля в электротехническом комплексе может быть применено множество различных методов [57]. Их можно подразделить на аналитические – дающие решение в явном виде, численные – вычисляющие значения искомых функций с привязкой к конечному набору координатных точек и численно-аналитические. В последнем случае результат ищется в виде некоторых аналитических функций для которых численно производится расчет удовлетворения граничным условиям.

Применение аналитических методов является возможным лишь для электротехнических комплексов простейшей конфигурации, представляющих академический интерес и преимущественно хорошо известных. Однако получаемые при их использовании решения в явном виде имеют наивысшую точность и могут быть использованы с целью верификации остальных методов.

Численные методы, в свою очередь, получили широкое распространение в настоящее время ввиду высокой адаптивности к условиям и ограничениям практических и научных задач, а также из-за существенной синергии от развития цифровых технологий. Данные методы моделирования электромагнитных полей подразделяются на интегральные и дифференциальные [35]. К интегральным относятся методы пространственных интегральных уравнений и различные формулировки метода граничных элементов.

В свою очередь методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ) относятся к дифференциальным методам. При этом в реализации МКЭ сложнее МКР, что компенсируется предоставляемыми преимуществами. Так МКЭ позволяет:

- производить вычисления для стационарных и нестационарных задач с расчетной областью произвольной формы, что часто необходимо при моделировании сложных реальных объектов [83];
- исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;
- для расчетов взаимосвязанных систем и решения физических задач из разных областей использовать построенную сетку без ее изменения.

Помимо этого, существует возможность варьирования размеров конечных элементов в зависимости от требуемой точности вычислений [90]. Эти и другие преимущества позволяют МКЭ быть одним из ведущих методов численного решения физических задач.

В настоящее время разработано множество программных комплексов (Ansys, MSC Nastran, Marc, Comsol Multiphysics и др.), использующих численные методы для широкого спектра моделируемых задач [67]. Применение метода конечных элементов в подобных программах стало особенно популярным после разработки алгоритмов автоматической генерации сети, таких как триангуляция Делоне, позволяющих раскрыть и использовать значительный потенциал совместного использования МКЭ и современных вычислительных средств.

2.2 Вычислительные алгоритмы решения уравнений электростатики и магнитостатики

Использование уравнений (2.6) и (2.7) совместно с рассмотренными граничными условиями в случае нахождения известных значений (определяемых ГУ) внутри расчетной области возможно с применением методов, построенных на принципе дискретизации расчетной области в набор взаимоувязанных подобластей.

Метод конечных элементов, нашедший в последнее время широкое применение, основан Вальтером Ритца в 1909 году и предполагает решение краевых задач путем представления искомой функции в виде суперпозиции

пробных функций и коэффициентов, которые находятся путем минимизации функционала, связанного с уравнениями Лапласа и Пуассона. Курантом было предложено использовать симплектические элементы. В плоскости это треугольник, в объеме – тетраэдр. Как было сказано ранее, такого рода элементы легко подстраиваются под любые граничные условия, а возможность вариации размеров позволяет регулировать точность вычислений.

Для уравнения Лапласа энергетический функционал выглядит:

$$W(u) = \frac{1}{2} \int |\nabla u|^2 ds, \quad (2.8)$$

где $\int ds$ – интегрирование по области Ω .

Для уравнения Пуассона энергетический функционал имеет следующую форму:

$$W(u) = \frac{1}{2} \int |\nabla u|^2 ds - \mu_0 \int u J ds. \quad (2.9)$$

Определение экстремума функционалов (2.8) и (2.9) рассмотрим на примере задачи стационарного электрического поля. Данная задача в общем случае сводится к минимизации функционала вида [110]:

$$\Phi[\varphi(x, y)] = \iint_{\Omega} F[x, y, \varphi, \varphi_x, \varphi_y] dx dy, \quad (2.10)$$

где $\varphi(x, y)$ – функция потенциала электрического поля;

φ_x, φ_y – частные производные по координатам, соответственно, x и y .

Подынтегральная функция $F[...]$ имеет непрерывные производные до второго порядка включительно.

Искомая функция φ на границе Γ области Ω должна удовлетворять значениям граничной функции f .

Экстремум такого функционала находится на основе определения функциональной производной в стационарной точке, то есть в такой точке, где функционал достигает своего минимума или максимума. Здесь под точкой понимается такое ее обобщение, при котором для определения этой точки требуется бесконечное количество координат [37], иными словами это просто

функция двух переменных в двумерном гильбертовом пространстве H^2 . При этом функция φ определена в области Ω . Графическое представление $\varphi(x, y)$ дано на рисунке 2.1.

Применение операции (1.9) для вычисления экстремального значения функционала (2.10) составляет суть теоремы Остроградского-Эйлера.

Воспользовавшись результатом этой теоремы, можем записать соответствующее уравнение Остроградского-Эйлера:

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_y} \right) = 0. \quad (2.11)$$

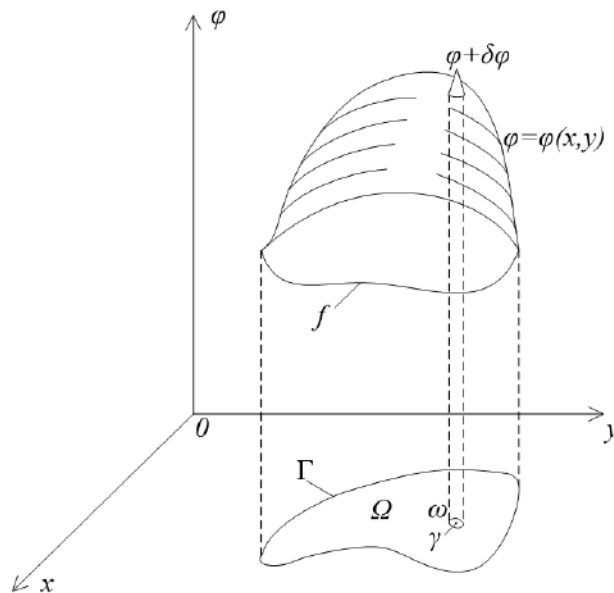


Рисунок 2.1 – График функции потенциала электрического поля

В частном случае, когда подынтегральная функция имеет следующий вид:

$$F = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

уравнение Остроградского-Эйлера становится эквивалентным уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (2.13)$$

с граничным условием

$$\varphi|_{\Gamma} = f. \quad (2.14)$$

Для получения расчетного алгоритма в простейшем варианте будем рассматривать скалярный потенциал u на плоскости.

Носитель функции φ имеет вид треугольного симплекса в двумерном пространстве H^2 (плоскость xOy на рисунке 2.2).

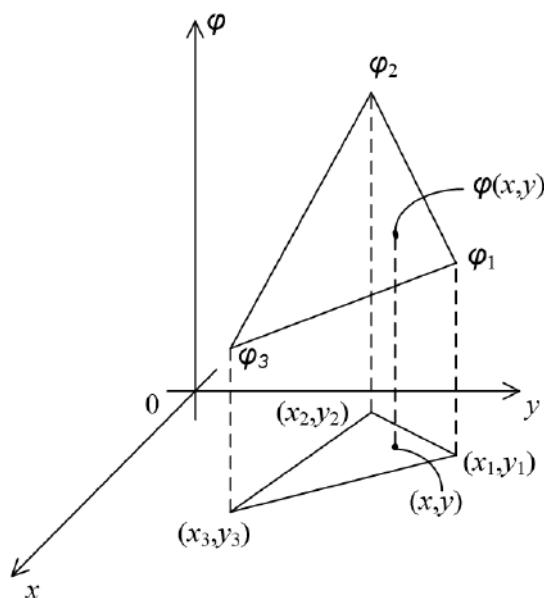


Рисунок 2.2 – Линейная потенциальная функция $\varphi(x, y)$

В вершинах симплекса потенциал будем считать на первых порах заданным и равным $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. Тогда текущее значение потенциала в точках, принадлежащих носителю $(x, y) \in \Delta$, определим линейной формой [83]

$$\varphi = a + bx + cy. \quad (2.15)$$

Для определения коэффициентов a, b , и c линейной формы (2.15) необходимо составить систему уравнений для угловых точек симплекса и разрешить ее относительно неизвестных коэффициентов [83].

Затем произведя покрытие всей области Ω треугольными элементами (рисунок 2.1) с учетом равенства потенциалов на границах смежных элементов получаем два множества точек. В точках, которые лежат на границе Γ , потенциалы заданы и определяются функцией (2.14), а потенциалы внутри области Ω неизвестны и находятся исходя из минимума функционала (2.10).

Отметим, что подстановка линейных функций φ в функционал (2.10) превращает его в функцию $N = n + m$ переменных, где N – количество узловых точек конечных элементов, n – неизвестные потенциалы, m – известные. В частном случае вида (2.12) эта функция является положительно определенной квадратичной формой, относительно потенциалов φ . Матрица, определяющая эту форму, получила название матрицы Дирихле. Поэтому в этом случае операция определения экстремума функционала превращается в обычное дифференцирование по n переменным. Подчеркнем, что дифференцирование осуществляется только по неизвестным потенциалам.

Матрица Дирихле каждого элемента легко вычисляется [83], поскольку производные в (2.12) от линейной функции (2.15) являются константами, хотя выкладки носят громоздкий характер. Для примера приведем элемент этой матрицы [83]:

$$S_{12}^{(e)} = \frac{1}{4A} \{(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)\}, \quad (2.16)$$

где A – площадь треугольного элемента.

Остальные восемь получаются путем циклической перестановки индексов координат.

Энергия одного элемента определяется на основании формул (2.10) и (2.12):

$$\Phi[\varphi] = \frac{1}{2} \varphi^T S^{(e)} \varphi, \quad (2.17)$$

где T – символ транспонирования вектора потенциалов $\varphi^T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$.

Таким образом уравнение Лапласа находится как некое экстремальное решения энергетического функционала (2.9) с применением уравнения (2.17). В ходе которого заменяем в (2.9) непрерывную потенциальную функцию координат u дискретными значениями для узлов конечных элементов и получаем дискретный аналог энергетического функционала вида:

$$W_d = \frac{1}{2} [u_f^T u_p^T] \begin{bmatrix} S_{ff} & S_{fp} \\ S_{pf} & S_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_p \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

где индекс f соответствует свободным потенциалам, а p – заданным, относящимся к граничным или начальным значениям, S_{ij} – матрицы, получаемые из

объединенной матрицы Дирихле всей расчетной области выделением элементов соответствующих индексам.

Минимум функционала находится на решении линейного уравнения вида [83]

$$[S_{ff}S_{fp}] \begin{bmatrix} u_f \\ u_p \end{bmatrix} = 0. \quad (2.19)$$

Для энергетического уравнения Пуассона (2.9) минимум функционала, по аналогии, будет определяться при решении следующего линейного уравнения [83]:

$$[S_{ff}S_{fp}] \begin{bmatrix} u_f \\ u_p \end{bmatrix} = \mu_0 C^T T_d J_d, \quad (2.20)$$

где C^T – транспонированная матрица связей, определяющая правило объединения узлов разрозненных конечных элементов;

T_d – матрица пересчета распределенного влияния источников, находящихся в пределах симплекса, к влиянию, сконцентрированному в его узлах;

J_d – амплитудные значения сконцентрированного в узлах влияния.

Необходимо отметить, что при расчете (2.20) правая часть уравнения определяется исключительно для узлов со свободными потенциалами.

После составления линейных уравнений (2.19) или (2.20) производится разделение переменных, составление системы линейных уравнений относительно неизвестных и их последующее разрешение стандартными методами. Результатом вычислений являются значения потенциалов u_f для всех свободных узлов системы.

Экстремумы (2.19) и (2.20) функционалов (2.8) и (2.9) позволяют находить решения уравнений Лапласа (2.7) и Пуассона (2.6).

Решение получается в виде планарных функций, которые по краям конечных элементов сшиты между собой непрерывно. Если попробовать изначально подставить планарные функции в дифференциальные уравнения, то это приведет к образованию разрывных функций на границах. Дальнейшее дифференцирование которых приводит к дельта-функциям.

2.3 Исследование точности модельных примеров

Одним из важнейших вопросов применения численных методов является определение достоверности метода и полученной на его основе математической модели. В связи с этим автором были написаны программы, реализующие вычисление МКЭ для задаваемых исходных данных, на Mathcad и C++, с помощью которых была произведена проверка МКЭ на примерах, имеющих аналитические решения. Результаты моделирования представлены в приложениях №А и №Б и опубликованы в [90].

В приложении №А рассмотрена программа вычисления электростатических и магнитостатических полей с применением метода конечных элементов, написанная на Mathcad. В приложении №Б рассмотрена программа вычисления этих же задач, написанная на C++. Основная идея приведенных программ, описанная в [83], переработана, дополнена и адаптирована под данные языки. В [90] приведено краткое описание сути метода, выполнена верификация используемого алгоритма на аналитическом примере с последующей оценкой точности вычислений. Данная проверка показала, что алгоритм дает удовлетворительные данные по точности и устойчивости, с возможностью снижения уровня относительной погрешности, при увеличении количества симплексных элементов, до величин сопоставимых с вычислительными погрешностями, возникающими из-за ограниченной разрядности используемых программ. В рассмотренном примере этот эффект был выявлен при величине погрешности менее 1%. При этом для метода конечных элементов уровень погрешности порядка 7-8% считается допустимой нормой [29].

С целью повышения точности вычислений в МКЭ существует возможность использования в симплексных элементах функций более высокого порядка, которые позволяют заменить кусочно-планарные функции на полиномы. Однако, в задачах для объектов со сложной структурой, формой или при использовании веществ с нелинейными характеристиками, к которым в полной мере относится анализ электромагнитных полей, придерживаются использования симплексов

первого порядка [83], а точность регулируют изменением их геометрических параметров.

Подводя итог можно отметить, что проблемы использования программ для МКЭ, написанных на Mathcad и C++, заключаются в представлении исходных данных, в частности ручного описания координат и связей узлов сетки конечных элементов и в ограниченности объемов вычислительных ресурсов, доступных данным программам. Mathcad является профессиональным инструментом, позволяющим решать задачи широкого спектра, что предоставляет существенный диапазон возможностей, но также накладывает ограничения на оптимизацию использования вычислительных ресурсов. Язык C++ позволяет написать узкоспециализированную вычислительную программу с необходимой степенью оптимизации, однако требования к квалификации программиста и количеству временных затрат возрастают экспоненциально сложности программы.

Исследование точности проведем на основе следующих примеров.

Пример 2.1. Исследование электростатического поля.

Задан коаксиал [14] с радиусом внутреннего проводника $r_1 = 1$ мм, внутренним радиусом внешнего трубчатого проводника $r_2 = 4$ мм. Потенциал внутреннего проводника $\varphi|_{r_1} = 400$ В, а трубчатый проводник заземлен ($\varphi|_{r_2} = 0$ В).

Анализ данного примера приведен в [15] в аналитическом виде. В работе [90] приведен результат моделирования МКЭ с применением программы на C++, рассмотренной в приложении Б, и произведена оценка точности использования МКЭ.

Аналитическое выражение потенциала приведено на рисунке 2.3а и имеет вид:

$$\varphi = C_1 \ln r + C_2, \quad (2.21)$$

где C_1 и C_2 – константы, определяемые из граничных условий.

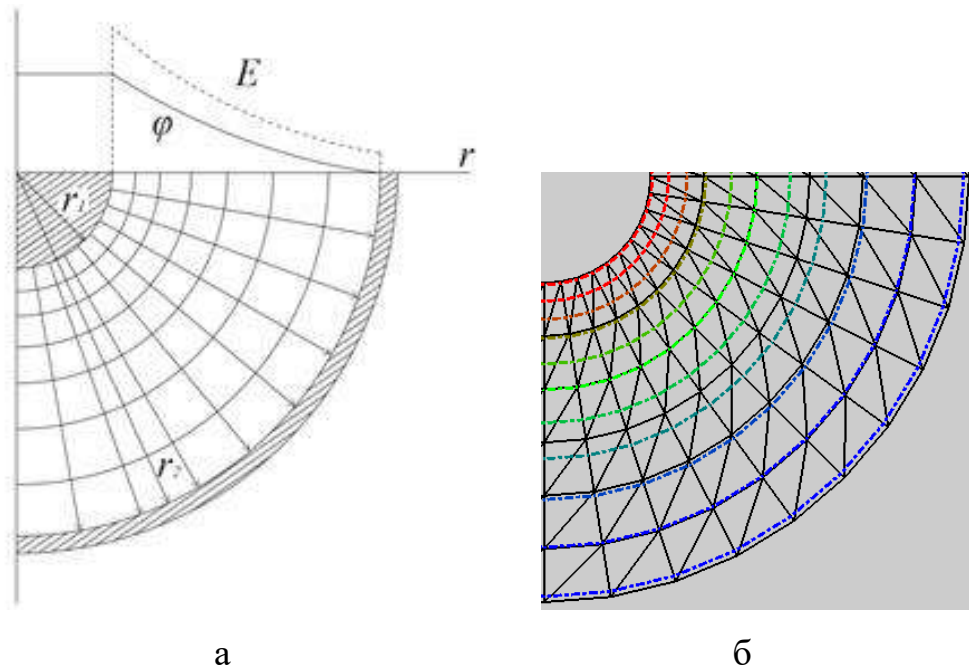


Рисунок 2.3 – Распределение потенциала в коаксиале:

а – аналитическая форма [15]; б – результат моделирования МКЭ (C++)

Результат моделирования МКЭ с использованием 120 симплексных элементов приведен на рисунке 2.3б. Цветными линиями на рисунке обозначены эквипотенциальные уровни.

При исследовании погрешности вычислений в зависимости от количества конечных элементов использовалась энергетическая метрика оценки погрешности расчетов потенциалов [90].

Погрешности выражены в относительных единицах в %. В качестве базовых значений для вычисления относительных погрешностей взята норма аналитического потенциала $\|\varphi_a\|$ и соответствующая энергия.

Данные расчёты представлены на рисунке 2.4 [90].

Теоретически ошибка в вычислении потенциала пропорциональна некоторой малой положительной величине θ . При этом ошибка в определении энергии пропорциональна θ^2 . Однако, проведенный вычислительный эксперимент, показывает, что для данной задачи это выполняется в диапазоне от 72 до 200 элементов.

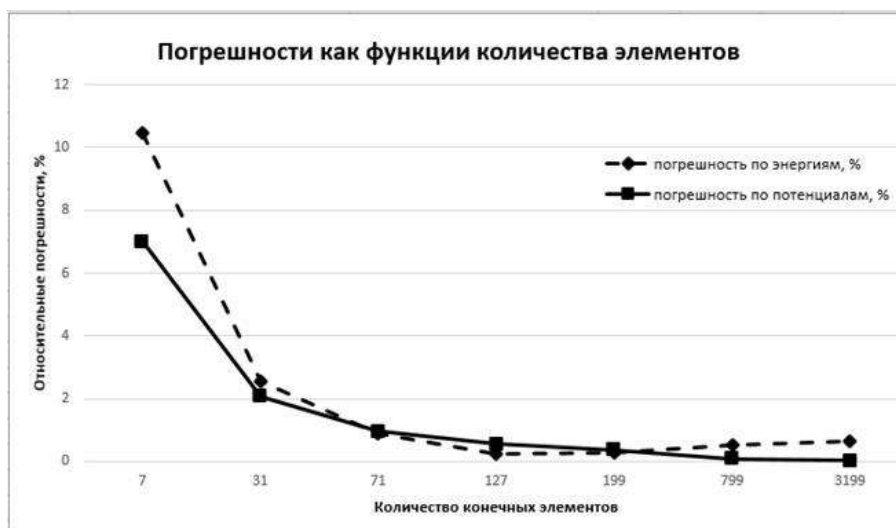


Рисунок 2.4 – Результат вычисления относительных погрешностей

При дальнейшем увеличении теория предсказывает, что ошибка по энергии должна уменьшаться существенно быстрее, чем ошибка по потенциалам, однако в действительности происходит все ровно наоборот. Причина такого поведения погрешностей может быть объяснена наличием вычислительных погрешностей, связанных с ограничением разрядности. Эти ограничения имеют случайный характер и поэтому проявляется неустойчивость ввиду уменьшения размеров конечных элементов. Отсюда следует вывод о том, что для дальнейшего уменьшения ошибки необходимо использовать на конечных элементах нелинейные поверхности более высоких порядков или программные комплексы, использующие большую разрядность вычислений.

Величины погрешностей, при незначительном увеличении количества симплексов, лежат в пределах допустимых величин, характерных для метода конечных элементов [29].

Пример 2.2. Исследование магнитостатического поля.

Задана коаксиальная структура [14]. Для сравнения произведем моделирование магнитостатического поля во внутреннем проводнике по аналитическому выражению и с применением программы на Mathcad. Радиус внутреннего проводника $a_1 = 4$ мм. Сила тока, протекающего в нем, $I = 1$ А. По внешнему проводнику ток протекает в обратном направлении.

Векторный потенциал аналитически определяется выражением:

$$A_z = -\frac{\mu_0 \mu_1 I r^2}{4\pi a_1^2}, \quad \text{при } r \leq a_1. \quad (2.22)$$

Фрагменты программы Mathcad, аналитические выражения и сравнение результатов моделирования приведены в Приложении А. Результат моделирования по аналитическому выражению приведен на рисунке 2.5а, а в программе Mathcad на рисунке 2.5б. Абсолютная ошибка моделирования показана на рисунке 2.6а.

Абсолютная ошибка явилась следствием укрупнения симплексов по мере приближения их к внешнему кругу, что наглядно видно по изображению сетки конечных элементов, приведенной на рисунке 2.6б. Относительная ошибка имеет величину 6,068%.

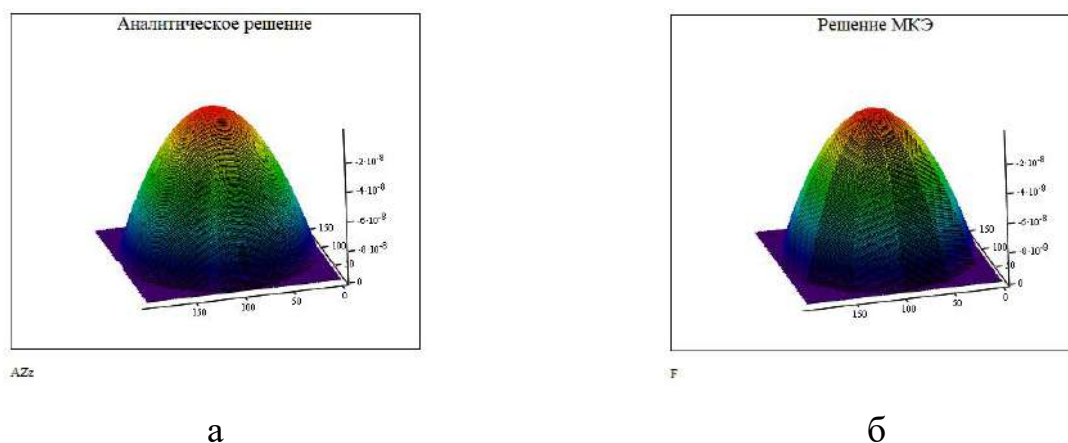


Рисунок 2.5 – Распределение потенциала в проводнике: а – аналитическая форма; б – результат моделирования МКЭ (Mathcad)

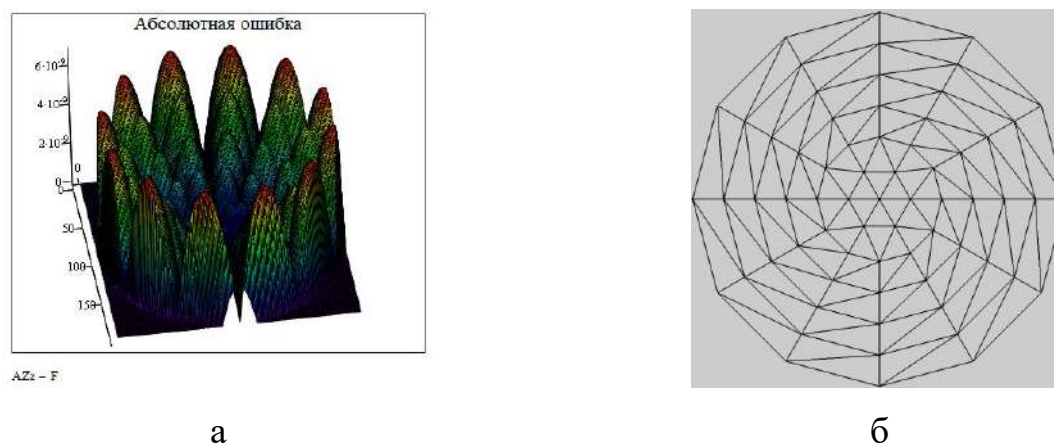


Рисунок 2.6 – Анализ результатов: а – абсолютная ошибка; б – сетка конечных элементов

В Приложении Б приведены фрагменты программы на C++, показаны результаты моделирования данной задачи с ее использованием и произведено сравнение с аналитической формой. Результат показал величину относительной ошибки равную 4,169%.

Величины ошибок не превышают уровни, допустимые для МКЭ [29]. Однако, в случае необходимости, ошибки моделирования могут быть уменьшены изменением количества, размеров и расположения конечных элементов [90].

Программы, разработанные на Mathcad и C++, и использованные для верификации метода аналитические примеры относились к задачам двумерного гильбертова пространства. Перевод моделирования с применением МКЭ из плоскости в трехмерную область составляет отдельную глобальную задачу, которая успешно выполняется компаниями производителями программного обеспечения.

Вопросам построения алгоритмов автоматической генерации сетки для последующего использования их в численных методах в настоящее время уделяется существенное внимание ученых [120]. При этом разработанные алгоритмы успешно применяются в современных программных комплексах, таких как Ansys, COMSOL Multiphysics, SolidWorks и др. Данные вычислительные пакеты позволяют облегчить построение модели, выполнить автоматическую генерацию сетки и произвести ее расчет с задаваемым уровнем точности.

Таким образом с целью научных исследований сложных электротехнических комплексов целесообразнее использовать современные программные вычислительные пакеты, которые позволят не только рассчитать моделируемый объект близко к реальному, но и произвести изучение его возможных модификаций с целью улучшения интересующих технических характеристик.

2.4 Исследование основной модели воздействия

Модель и результаты моделирования электромагнитного воздействия компонентов тяговой сети железной дороги на оболочку кабельной линии

управления электротехнического комплекса рассмотрены подробно в приложении В, а также прошли апробацию в [102].

Данная модель выбрана для исследования, так как среди электротехнических комплексов железнодорожного транспорта тяговая сеть является основным источником электромагнитных воздействий на все смежные системы и линии коммуникаций. Значительная протяженность железных дорог и возрастающая со временем интенсивность грузоперевозок постепенно осложняют электромагнитную обстановку и делают актуальными вопросы исследования степени влияния и разработки современных мер защиты от них.

При этом линии коммуникаций, в том числе кабельные, являются важными элементами железнодорожной инфраструктуры, отвечающими как за возможность осуществления перевозок, так и за обеспечение их безопасности.

Геометрический профиль модели представлен на рисунке 2.7. Рассмотрена система тягового электроснабжения переменного тока 27,5 кВ с частотой 50 Гц. Модель включает контактный провод и рельсы, расположенные в воздушной среде и кабельную линию, размещенную на глубине 1 м под землей и отнесенную на 5 м от крайнего рельса.

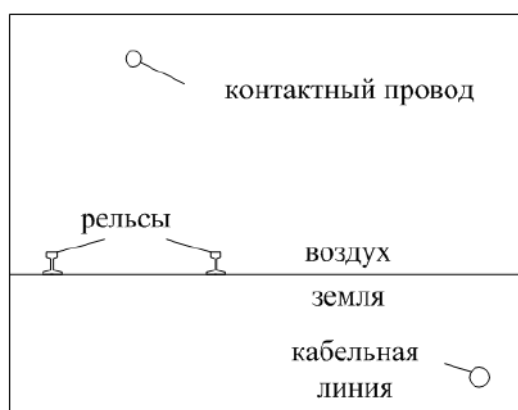


Рисунок 2.7 – Геометрическое представление модели

В качестве источников электромагнитного влияния выступали контактный провод и рельсы, а объектом, по которому оценивался результат воздействия генерируемого электромагнитного поля, выбрана стальная броня. Для

моделирования в качестве данной оболочки кабеля использована стальная труба с внутренним радиусом 20 мм и толщиной 1 мм.

Включение кабельной линии в расчетную модель направлено на снижение погрешности в расчете распределения токов, электромагнитных полей и одновременное определение величины наведенного влияния. Выполнить такое включение становится возможным при переходе к трехмерной модели.

Реальные железнодорожные участки, расположенные между соседними станциями, занимают десятки километров. Однако, такая протяженность для математической модели с высокой степенью детализации элементов на текущем этапе развития вычислительной техники нереализуема.

В связи с чем было предложено выполнить моделирование небольшого участка железнодорожного пути с последующей экстраполяцией результатов.

Моделирование произведено с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics [102]. Расчеты в данном комплексе производятся в результате аппроксимации МКЭ уравнений Максвелла (2.1) – (2.3), однако, в программе записанных в иной нотации.

Схемное изображение цепи тягового питания приведено на рисунке 2.8а. На рисунке 2.8б указана схема подключения оболочки кабельной линии.

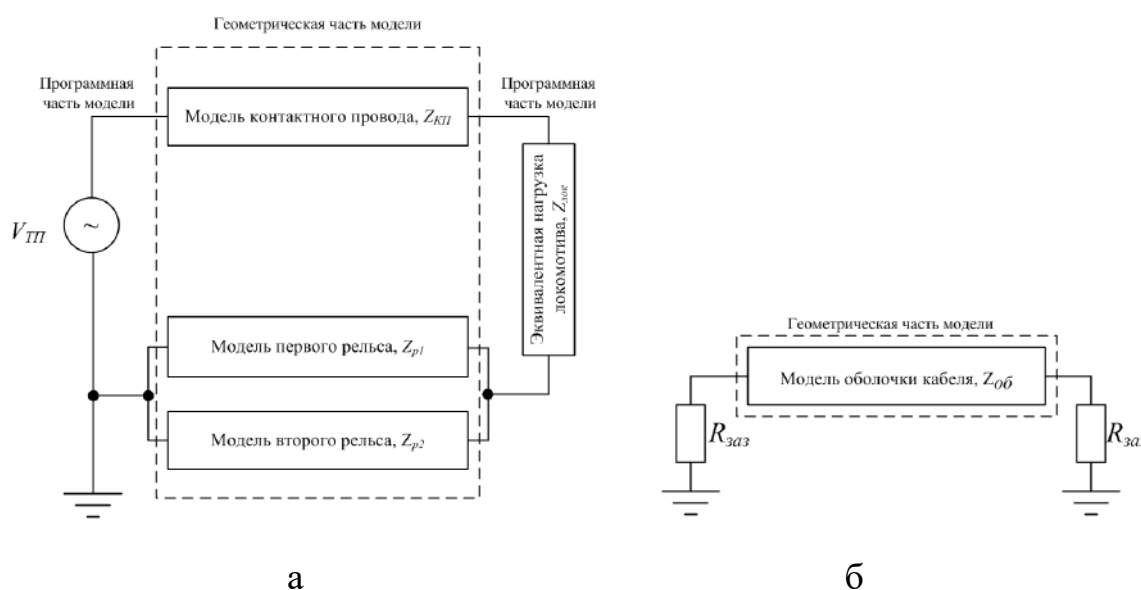


Рисунок 2.8 – Моделируемые структурные схемы: а – цепь тягового питания (влияющая); б – подверженная влияниям цепь

На рисунке 2.8а напряжение тяговой подстанции представлено $V_{ТП}$. Для контактного провода принято обозначение $Z_{КП}$, а $Z_{р1}$ и $Z_{р2}$ для левого и правого рельса.

В качестве нагрузки цепи выступает сопротивление $Z_{лок}$ эквивалентное тому, что вызывает электрические потери при прохождении тока по цепям тягового питания локомотива.

При моделировании случая нахождения на участке только одного локомотива сопротивление $Z_{лок}$ выбрано исходя из соображения, что ток, потребляемый одним электроподвижным составом из тяговой сети, равен 140 А.

На рисунке 2.8б элементом $Z_{об}$ обозначена оболочка кабеля, которая с обоих концов заземлена, через эквивалентное сопротивление $R_{заз}$. Данное подключение имитирует подключение оболочки кабеля к контуру заземления при вводе его на объекты железнодорожной инфраструктуры.

По краям модели добавлены небольшие зоны по 0,2 м к которым применена настройка области бесконечных элементов, что позволяет при расчете масштабировать эту часть с коэффициентом 10^3 . Это дает уменьшение количества симплексов и снижает искажения в пределах исследуемой области с соблюдением всех граничных условий.

Геометрическая протяженность модели принята равной 2 м. Помимо этого, для всех ее элементов использованы дополнительные настройки системы масштабирования, которые устанавливают кратность глубины $\times 5$. Аналогичная корректировка внесена в настройки каждого элемента и системы визуализации.

Таким образом геометрически модель прорисована для 2 м, а в математическом представлении и графическом отображении она эквивалентна участку 10 м. Это позволило существенно сократить сложность вычислений, увеличив при этом моделируемый участок. Данная процедура стала возможна благодаря предположению, что в пределах рассматриваемого участка все элементы сохраняют свои относительные геометрические положения неизменными. Также это можно применить если относительные положения объектов изменяются равномерно и линейно по всей длине.

Графическое представление полученной геометрической модели и ее компонентов приведено на рисунке 2.9.

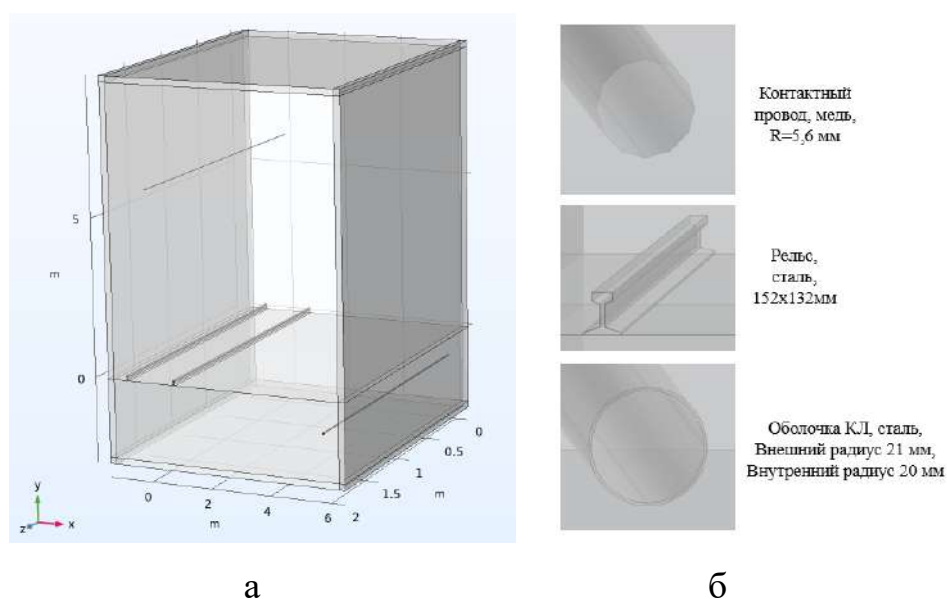


Рисунок 2.9 – Визуализация геометрической модели:

а – общий вид, б – элементы модели

Следующим шагом моделирования с применением МКЭ является построение сетки конечных элементов. В используемом программном комплексе для выполнения данного шага необходимо задать параметры сетки, а само построение выполняется автоматически с использованием встроенных алгоритмов.

Помимо указания параметров сетки модель была разделена на две части. В первую вошли элементы, требующие повышенной точности моделирования, это контактный провод, рельсы и оболочка кабеля. Для этой группы выбрана настройка оптимизации для маленьких элементов. Во вторую часть отнесена остальная расчетная область с оптимизацией для больших элементов.

Результат построения сетки представлен на рисунке 2.10. Следует отметить, что сетка строится для всего объема, однако, визуально отображаются лишь ребра конечных элементов, располагаемые на внешних границах объектов. Также на рисунке 2.10 видно, что размер сетки вблизи и в самих проводящих элементах существенно меньше, чем в свободном пространстве.

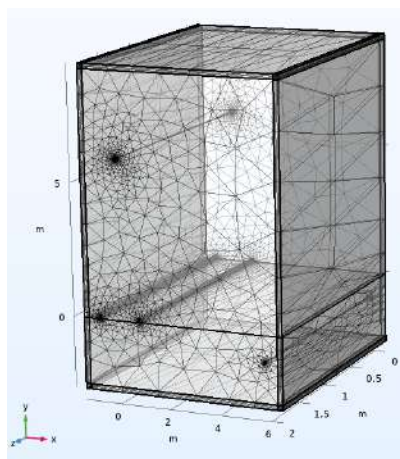


Рисунок 2.10 – Сетка конечных элементов

Результатом моделирования являются изображения нормализованной плотности магнитного потока (рисунок 2.11а) и электрического поля (рисунок 2.11б и 2.11в), а также численное распределение токов в проводниках модели.

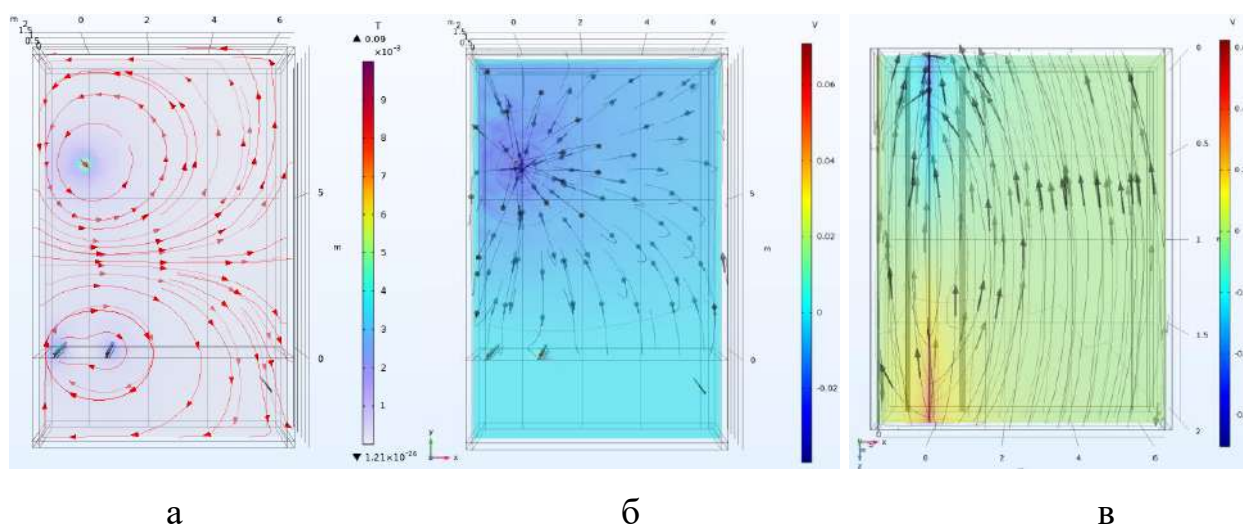


Рисунок 2.11 – Результат моделирования электромагнитных полей:
 а – нормализованная плотность магнитного потока с линиями напряженности; б – электрическое поле с линиями напряженности (главный вид); в – электрическое поле (вид сверху)

По рисунку 2.11а видно, что токи в рельсах протекают в противоположную сторону току в контактном проводе. Их магнитные поля встречны, что иллюстрируется направлениями линий напряженности, и частично компенсируют

друг друга, снижая наводимое на кабельную линию влияние. При этом основное влияние оказывает магнитное поле, создаваемое рельсами, а не поле от контактного провода. Наличие кабельной линии в свою очередь искажает равномерность распределения токов между рельсами. Также отметим, что земля не является помехой для магнитной составляющей воздействия.

Линии напряженности электрического поля замыкаются между началом и концом моделируемого контактного провода (рисунок 2.11в), а также на землю (рисунок 2.11б). Это обусловлено разностью потенциалов между точкой подключения источника питания с одной стороны и нагрузки с другой, вызываемой электрическими потерями в самом проводе. Земля в свою очередь является проводником с нулевым потенциалом. Таким образом влияние электрической составляющей поля на кабельную линию отсутствует.

Наличие контакта рельс-земля, проводимости земли и неидеальности изоляции кабельной оболочки приводит к наличию гальванической составляющей воздействия, что может быть проиллюстрировано, например, токами проводимости, представленными на рисунке 2.12.

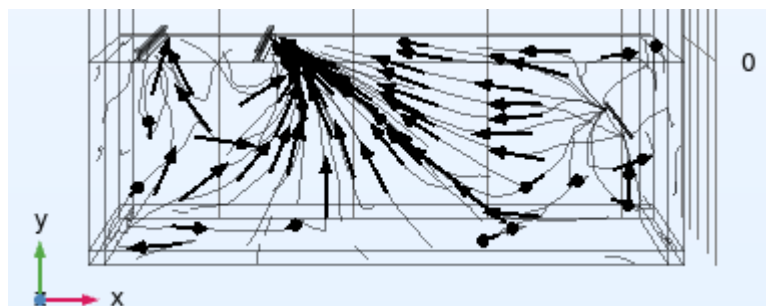


Рисунок 2.12 – Токи проводимости в подземной части модели

Численное распределение токов в проводниках модели представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы

	Контактный провод	Рельс первый	Рельс второй	Оболочка кабельной линии
Амплитуда тока, А	141,36	81,13	60,23	0,725
Фаза тока, град	-0,94	179,13	178,98	73,99
Частота, Гц	50			

Полученное значение тока в контактном проводе по амплитуде эквивалентно потреблению одиночной «электрички». При этом рассмотрено влияние лишь от одного из всех возможных источников электромагнитных излучений с расчетом лишь для одной влияющей гармоники. Реальный ток при движении электроподвижного состава имеет множество гармонических составляющих в широком диапазоне частот, образуемых в результате не идеальности преобразовательной аппаратуры локомотива, искрообразования при движении пантографа по контактному проводу, а также проблем с верхним строением железнодорожного пути. Результат воздействия такого полигармонического спектра складывается по закону суперпозиции и принимает стохастический характер.

Результат моделирования может быть экстраполирован на более протяженный участок, в пределах расстояния между двумя заземлениями смежной линии, исходя из следующих соображений: при увеличении протяженности возрастет наводимое падение напряжения между концами исследуемой линии, но также пропорционально увеличится и сопротивление материала, что в итоге даст ту же величину наведенного тока. При наличии дополнительных заземлений наводимый ток будет секционироваться, что снизит его максимальную величину на отдельных участках между двумя соседними заземлителями.

Для сравнения в работе [64] производится моделирование движения пачки поездов по участку и приводится профиль тока поезда массой 6300 т, приведенный на рисунке 2.13. Как видно по рисунку 2.13 пиковые значения потребляемого тока

достигают величин 600 А. Также в [64] выполняется расчет при одновременном движении пачек поездов в обоих направлениях, данный график приведен на рисунке 2.14.

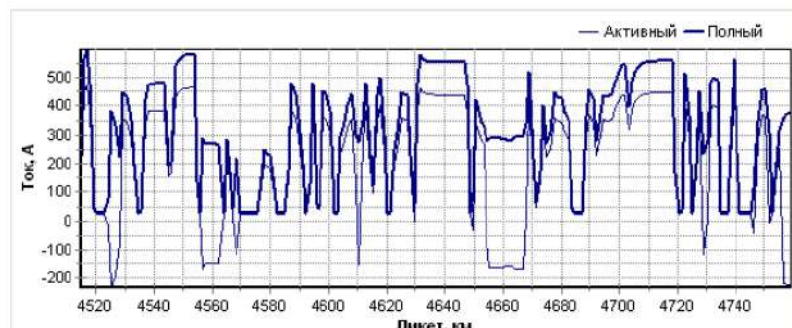


Рисунок 2.13 – Профиль тока четного поезда массой 6300 т [64]

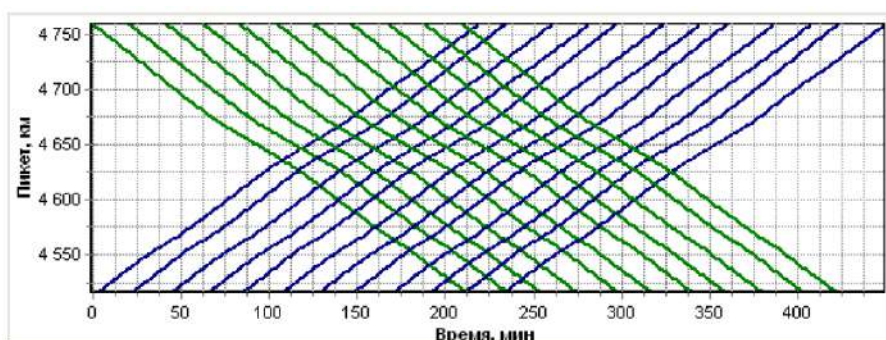


Рисунок 2.14 – Расчетный график движения поездов [64]

В связи с этим произведен пересчет токов по рассматриваемой модели при нагрузке эквивалентной грузовому поезду. Результат представлен в таблице 2.2. Наводимые на оболочку кабеля токи также существенно возросли.

Таблица 2.2 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы для токопотребления грузового поезда

	Контактный провод	Рельс первый	Рельс второй	Оболочка кабельной линии
Амплитуда тока, А	599,61	344,13	255,48	3,07
Фаза тока, град	-3,97	176,09	175,95	70,96

Из полученных результатов и рисунков 2.13, 2.14 можно сделать вывод, что наводимый на смежную линию ток имеет стохастический характер и может быть существенно выше полученных результатов в случае, например, прохождения по участку грузового электроподвижного состава или пачки поездов, при одновременном прохождении поездов по участку в обоих направлениях и т.д., то есть является следствием наложения влияний от множества факторов.

Также значительный интерес представляет исследование методов снижения наводимых влияний. Одним из эффективных методов является изменение схемы питания, например, применение системы питания с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

Используемый программный комплекс позволяет гибко подстраивать модель под исследуемую задачу. Так для перевода модели на систему с ЭУП геометрическая часть была дополнена двумя медными проводниками, расположенными с внешней стороны опоры контактной сети. Усиливающий провод был размещен на расстоянии 4,5 м от контактного провода и на высоте 8 м от головки рельса. Экранирующий подвесили соответственно на расстоянии 3,8 м от контактного провода и на 8,4 м над рельсами.

Схема питания при этом была изменена следующим образом: усиливающий провод подключен параллельно к контактному, а экранирующий – к рельсам. Полученные распределения полей приведены на рисунке 2.15.

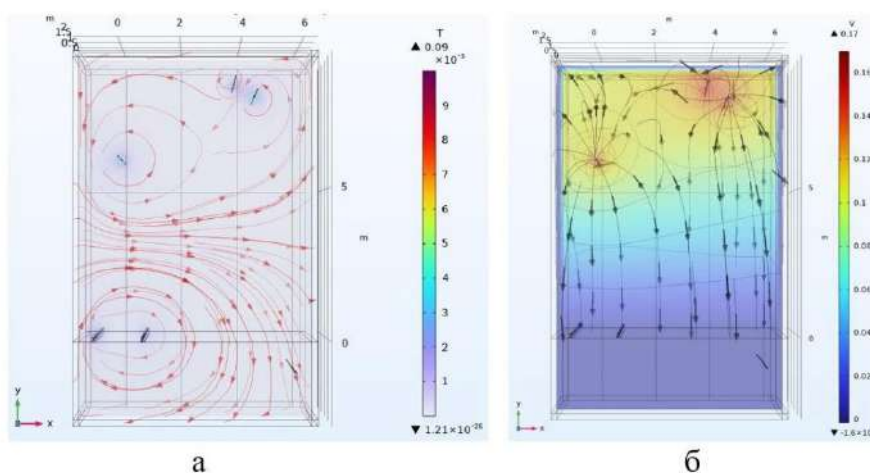


Рисунок 2.15 – Распределение полей для модели с системой тягового электроснабжения с экранирующим и усиливающим проводами:

а – магнитное поле; б – электрическое поле

Численное распределение токов в проводниках модели с ЭУП для двух вариантов потребляемых токов представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы с ЭУП для двух величин питающего тока

Моделируемый проводник	Вариант № 1		Вариант № 2	
	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град
Контактный провод	66,77	-0,603	283,77	-2,174
Рельс первый	52,25	179,21	222,06	177,64
Рельс второй	39,1	179,06	166,19	177,49
Оболочка кабельной линии	0,376	73,59	1,6	72,02
Усиливающий провод	74,62	-0,377	317,17	-1,948
Экранирующий провод	50,05	-179,81	212,71	178,62

Как видно по результатам моделирования перевод тягового питания на систему с ЭУП позволяет получить снижение наводимых на смежную линию токов в 1,92 раза, что согласуется с теоретическими положениями и, в свою очередь, подтверждает возможность применения МКЭ и предлагаемой модели для исследований в сфере определения наводимых влияний и разработки методов защиты от них.

Следует отметить, что математическое моделирование позволяет получить значения, лишь для конкретного модельного примера, имеющего ряд ограничений и допущений. Так данная модель в качестве источника влияний рассматривает лишь систему тягового питания. Реальные наведенные токи, в свою очередь, являются результатом одновременных случайных воздействий от множества источников и естественно будут отличаться от результатов моделирования.

Помимо различных систем тягового питания, параметров ее нагрузки и источников влияний математическая модель позволяет учесть сложные граничные условия. Так реальное железнодорожное полотно, в отличие от модели на

рисунке 2.9 имеет более сложное строение. В дополнение к этому земля по своей структуре имеет неоднородную слоистую природу, нагрузка включает еще и реактивную составляющую, а также многие другие факторы. Учесть все детали в модельном примере не представляется возможным ввиду органичности вычислительных ресурсов, необходимых для обработки получаемого массива уравнений. Однако, для повышения степени приближения моделируемого объекта к реальному достаточно учесть часть из них. Рассмотрим вариант модели, представленный на рисунке 2.16.

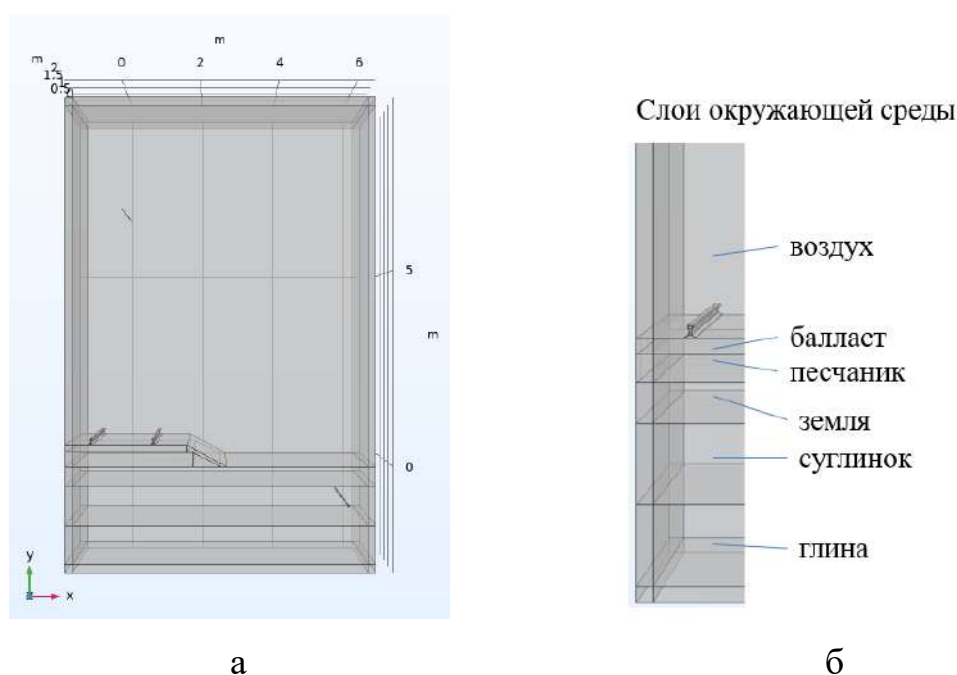


Рисунок 2.16 – Модель, выполненная с учетом балластного слоя и слоистости земли: а – общий вид; б – слои окружающей среды

Электрические параметры слоев земли выбраны по рекомендуемым расчетным значениям, приведенным в таблице 1.1. и дополнены удельным сопротивлением слоев балласта (1 к Ом·м) и песчаника (700 Ом·м). Результаты расчета представлены на рисунках 2.17, 2.18 и в таблице 2.4.

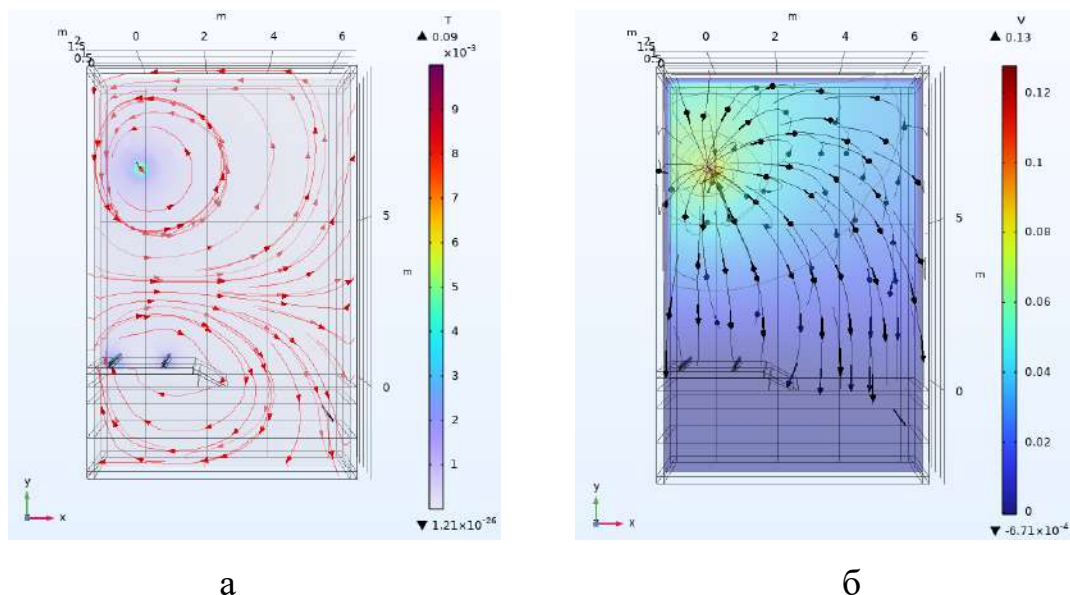


Рисунок 2.17 – Рассчитанное распределение полей:

а – магнитное поле; б – электрическое поле

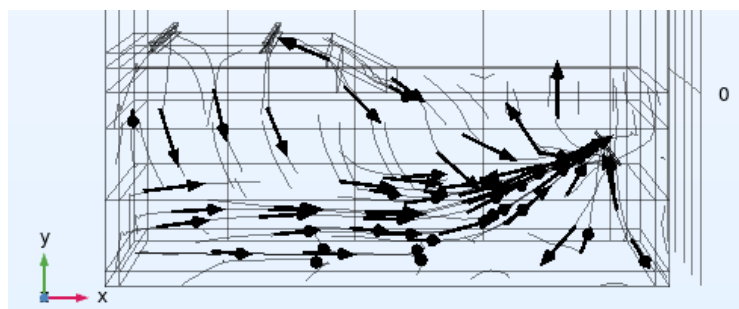


Рисунок 2.18 – Токи проводимости в подземной части модели

Таблица 2.4 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках модели

	Контактный провод	Рельс первый	Рельс второй	Оболочка кабельной линии
Амплитуда тока, А	140,33	78,76	61,56	0,325
Фаза тока, град	-30,73	149,37	149,14	-134,04

Как видно по представленным результатам в данной модели учтены сложные граничные условия и индуктивный характер нагрузки, а структура железнодорожного пути дополнена балластным слоем. Все эти дополнения

привели к перераспределению токов в земле, в проводниках модели и, как следствие, вызываемым ими полям.

Таким образом применение математического моделирования на основе строгих методов расчетов позволяет получить ответ на вопрос о том, как поведут себя моделируемые компоненты в конкретных ситуациях.

Для детального анализа процессов образования наводимых влияний необходимо осуществить сбор базы статистических данных и, используя стохастический математический аппарат, изучать параметры распределений, выполняя декомпозицию и выявление характеристик и степени влияния отдельных источников. После определения статистических параметров влияющих источников необходимо применение математического моделирования, которое позволит детально исследовать процессы воздействий и разработать соответствующие меры по защите от них [129].

2.5 Сопоставление модельных и экспериментальных данных

С целью сбора статистических данных были проведены экспериментальные исследования по измерению параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии оперативно-технологической связи (ОТС) железнодорожного транспорта.

В рамках исследования ставилась задача получения уточненных данных о перенапряжениях и токах, возникающих в кабельных линиях связи, подверженных электромагнитному влиянию, для разработки рекомендаций по совершенствованию организационных мероприятий и технических средств защиты окончного оборудования.

Испытания по измерению действующих значений напряжений и токов, возникающих в кабельных линиях железнодорожной инфраструктуры, должны проводиться в следующем объеме: проверка значений тяговых токов в тяговой сети в различных режимах ее эксплуатации; измерение психофотометрических напряжений;

измерение индуцируемых в оболочке кабеля токов от внешних влияний; определение опасных напряжений, индуцируемых в кабельных линиях.

Измерения должны проводиться для различных значений тягового тока в нормальном и вынужденном режиме работы тяговой сети. При этом предварительно необходимо определить характеристики опытного участка: марку кабеля; количество заземлений на участке кабельной линии; величину сопротивления устройств заземления; распределение цепей кабельной линии по назначению; системы передачи; расстояния сближения с источниками внешних влияний; характер проявления внешних влияний; другие характеристики участка необходимые для определения величин внешних влияний.

Результаты испытаний должны оформляться протоколами и актами в установленном в ОАО «РЖД» порядке.

Испытания по измерению параметров электромагнитных влияний проводились на основании технического задания субподрядного договора 86/1501 на сети Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» согласно установленным программе и методике (Приложение Г) на следующих постах электрической централизации (ЭЦ):

- 1 - ст. Кизитеринка, участок ст. Кизитеринка – ст. Ростов-Товарная;
- 2 - ст. Песчанокопская, участок ст. Песчанокопская – раз. Меклета;
- 3 - ст. Подкумок, участок ст. Подкумок – ст. Кисловодск.

Объектом испытаний являлись кабели марок МКБКМБ 14х4, МКПпАБпШп 7х4х1,05+5х2х0,7+1х0,7 и МКПпАБпШп 7х4х1,05+ +5х2х0,7+1х0,7.

Остальные параметры исследуемых линейно-кабельных сооружений и результаты всех проведенных испытаний по наведенным влияниям приведены в приложении Д.

Из проведенных испытаний по измерению параметров электромагнитных влияний наиболее интересным случаем были измерения, проведенные на ст. Подкумок, пост ЭЦ. Тяговая сеть участка ст. Подкумок – ст. Кисловодск Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» на момент исследований имела одностороннее питание, что эквивалентно вынужденному режиму работы

тяговой подстанции. Такая система питания относится к аварийным, характеризуется опасными уровнями наводимых влияний и, в соответствии с [73], является одним из двух расчетных режимов при определении критических уровней наводимых влияний.

Приведем результаты экспериментальных измерений по определению действующих значений напряжений и токов, возникающих в кабельных линиях железнодорожных инфотелекоммуникаций для данного случая.

Измерения проводились на посту ЭЦ ст. Подкумок. Объектом испытаний был кабель МКПпАБпШп 7x4x1,05+5x2x0,7+1x0,7 прокладки 2006 г. В качестве испытательного оборудования использовались: токовые клещи АРРА 39Т, зав. № 75500122; мультиметр цифровой АРРА-109N, зав. № 73601401; мультиметр цифровой АРРА-305, зав. № 74202421; псофометр П-323ИШ, зав. № 035694.

Токовые клещи подключались на оболочку брони измеряемого кабеля перед входным заземлением. Они позволяют измерить общее электромагнитное поле кабеля, создаваемое информационными и наведенными токами. Сигнальные токи имеют незначительные величины и протекают по паре жил в противоположных направлениях компенсируя электромагнитное поле друг друга. Токи электромагнитных воздействий протекают в одном направлении во всех проводниках и создают значительное суммарное электромагнитное поле. Следовательно, подключив измерительные клещи на оболочку кабеля можно определить уровень наведенных на кабельную линию электромагнитных влияний.

Полученные действующие значения напряжения с выходов токовых клещей снимались мультиметром и через его оптический выход заносились специализированной программой в таблицу результатов. Программа позволяет производить автоматизированные измерения с частотой 2 замера в секунду. Одновременно с этим замерялось псофометрическое напряжение шума в измеряемом кабеле и напряжение жила-земля, при замыкании этой жилы на дальнем конце на землю.

Испытания длились более 3 часов. Схема организации измерений приведена на рисунке 2.19.

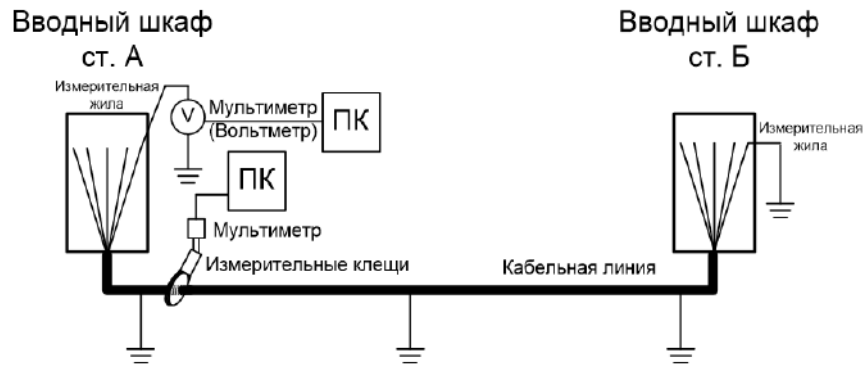


Рисунок 2.19 – Структурная схема организации измерений

В дальнейшем был произведен пересчет измеренных напряжений в значения наводимых на оболочку кабеля токов. Результаты приведены на рисунке 2.20. Предварительный анализ полученных результатов показал, что отдельные выбросы наводимого тока могут достигать более 20 А в виде коротких импульсов. Среднее значение складывается из уровней естественного шума и наводимого от проходящих мимо поездов, как основных источников влияний на железнодорожном транспорте.

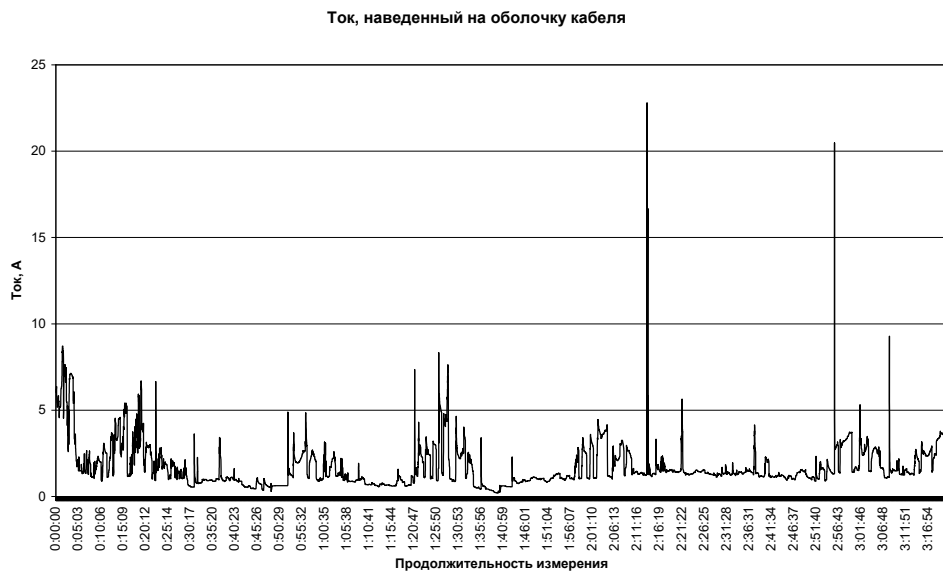


Рисунок 2.20 – Опасные и мешающие влияния, наведенные на кабельную линию

По рисунку 2.20 наглядно видны временные отрезки, характеризующиеся движением поездов по участку. По данным расписания ОАО «РЖД» на участке в этот период находилось до 3 электропоездов одновременно.

Используемый на участке магистральный кабель имеет броню из двух стальных лент и алюминиевую оболочку. Все слои отделены друг от друга защитными полиэтиленовыми шлангами. Броня и оболочка обеспечивают жилам защиту от механических, атмосферных и электромагнитных влияний. Механизм экранирования жил оболочкой основан на индуцировании в этих элементах однонаправленных токов, которые своими электромагнитными полями снижают итоговое внешнее воздействие. Негативной стороной экранирования становится дополнительный нагрев оболочек кабеля, что в свою очередь при чрезмерных токах может привести к плавке покровов или даже возгоранию. Так же значительные наведенные влияния могут вывести из строя защитные вводно-кабельные устройства.

В результате сопоставления модельных и экспериментальных данных можно отметить, что значения, полученные в результате моделирования, не противоречат измеренным величинам.

2.6 Выводы по главе

Применяемая в настоящий момент методика определения опасных и мешающих влияний не учитывает ряд важных факторов, не обеспечивает необходимой степени точности предсказания в современных условиях и требует совершенствования.

Результат моделирования позволяет уверенно фиксировать высокую степень влияния электромагнитных полей на кабельные линии железнодорожной инфраструктуры со стороны системы тягового электроснабжения.

Математическое моделирование обладает возможностью разложения степени влияния на составляющие факторы, что позволяет раскрыть внутреннюю структуру механизма взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса и открывает способы борьбы с вредными последствиями наводок.

Исследования показывают, что наводки с ростом трафика грузоперевозок будут расти, а, следовательно, необходимо разрабатывать современные меры защиты от электромагнитных влияний.

Результаты расчетов позволяют утверждать, что при других значениях потребляемой нагрузкой легко получить значения наведенных токов в кабеле по соответствующему алгоритму.

Данные исследования позволяют выработать рекомендации по борьбе с наведенными токами, поскольку известны более точные параметры тока. Использование модельных примеров при разработке новых систем защиты значительно сокращают временные и материальные затраты.

3 СИНХРОНИЗАЦИЯ В УСТРОЙСТВАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

3.1 Синхронизация и факторы, влияющие на ее устойчивость

Необходимость повышения эффективности использования подвижного состава требует значительных усилий для разрешения различных вопросов по организации эффективного управления им, которое складывается не только из логистических операций планирования, но и непосредственного регулирования, управления и контролирования процесса перевозки в динамике. При этом управление осуществляется как непосредственно передачей команд обслуживающему персоналу, так и с помощью множества сопутствующих и резервирующих систем, включая системы электроснабжения, телемеханики, автоблокировки, связи и другие. Для повышения коэффициента готовности всех этих устройств необходимы системы, контролирующие их работоспособность и состояния в различные моменты времени и передающие эту информацию управляющему персоналу. Своевременная передача команд управления и данных о результатах контроля осуществляется системой связи с обратным каналом. Так же множество информационных систем занимается обработкой и первичным анализом измеряемых данных, результаты которого представляются оператору или диспетчеру для принятия управляющих решений.

Современные тенденции развития техники и технологий включают создание единой инфокоммуникационной сети, которая требует цифровизации всех элементов, высокоскоростных линий связи и обеспечения непрерывного мониторинга. Оборудование связи является транспортным уровнем для обеспечения функционирования всех систем управления, в том числе и систем, обеспечивающих безопасность движения поездов.

Часто при рассмотрении цифровых систем не упоминается такой важный элемент, как система синхронизации. Однако, наличие синхронизации всегда подразумевается, так как цифровая система не может функционировать при ее

отсутствии в том или ином виде. При этом чем важнее передаваемые сообщения, тем выше требования к системе синхронизации на всех ее уровнях. Наиболее распространенные из них относятся к фазовой, цикловой и сверхцикловой синхронизации. Каждый следующий уровень повышает возможную скорость функционирования остальных систем, но при этом так же опирается на стабильную работу всех предыдущих уровней.

Фазовая синхронизация относится непосредственно к физическому уровню и является единой базой для всех остальных. В отличие от остальных видов синхронизации, она не может быть заменена цифровым аналогом, так как физически передаваемые сигналы, а значит и параметры фазовой синхронизации, под воздействием помех в соединительных линиях могут принимать любые значения, что осложняет их детектирование и уменьшает достоверность. В случае потери фазы теряется актуальность всей принимаемой информации. Таким образом рассмотренная специфика системы фазовой синхронизации делает ее самым критичным звеном всего комплекса.

Современные системы управления перевозочным процессом строятся по централизованному принципу. При этом сигналы телесигнализации и телеуправления передаются от диспетчера, располагающегося в центре управления, непосредственно к исполняющим устройствам в зоне его ответственности, через развитую сеть цифровой связи наравне с другими видами передаваемой информации. Одним из основных недостатков такой схемы организации, является то, что линии передачи располагаются в непосредственной близости к железнодорожному полотну и линиям тягового электроснабжения, в результате чего все время подвержены повышенным уровням электромагнитных воздействий, которые и являются основной причиной возникновения помех и сбоев.

Так же на ряду с линиями связи в непосредственной близости к железной дороге располагается и само телекоммуникационное оборудование. Оно так же подвержено негативным влияниям со стороны повышенных электромагнитных полей. Наводимые в оборудовании токи, будут слабее, чем приходящие со стороны

линии, однако же чувствительность электронных устройств к непосредственным воздействиям гораздо выше.

Эти факторы наглядно демонстрируют значимость вопросов ЭМС и, вместе с ними, актуальность разработки систем защиты для устройств управления и линий их соединяющих.

Рассмотрим в упрощенном виде схему фрагмента цифровой системы передачи сигналов автоматики, телемеханики и связи. Структурная схема приведена на рисунке 3.1 [86].

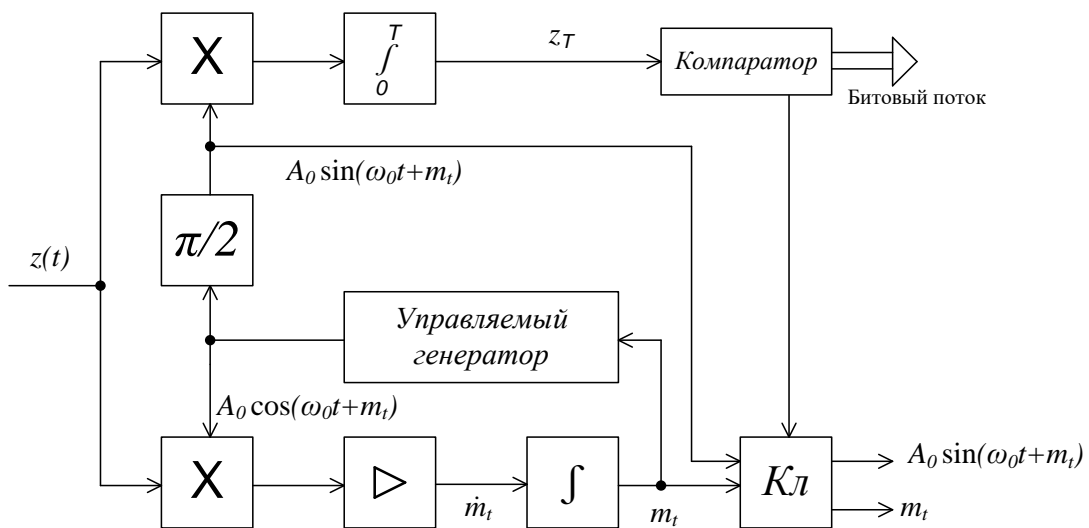


Рисунок 3.1 – Структурная схема фазовой синхронизации

В составе схемы имеются перемножители, интеграторы, управляемый генератор, решающие устройства, фазовращатель. Принцип работы схемы основан на использовании обратной связи для подстройки генератора к режиму высокой корреляции опорного и приходящего сигнала. При расстройке фазы возникает ошибка в приеме сигналов, отображающие соответствующие биты 0 или 1.

Для оценки влияния наведенных токов на фазовую синхронизацию предположим, что фаза опорного сигнала $\hat{s}(t)$ и входящего $z(t)$ различаются на некоторую $\Delta\varphi$. Пусть цифровой поток передается с использованием фазовой модуляции. В этом случае корреляционный интеграл будет иметь вид:

$$K(T) = \int_0^T z(t)\hat{s}(t)dt, \quad (3.1)$$

где $z(t)$ – сигнал после воздействия шума, описываемый выражением:

$$z(t) = s(t) + n(t), \quad (3.2)$$

где $s(t)$ – исходный, передаваемый сигнал;

$n(t)$ – аддитивный гауссовский шум.

Обозначив спектральную плотность флуктуационных шумов в канале N_0 определим вероятность ошибки для случая оптимального детектирования при $\Delta\varphi=0$ в соответствии с формулой [84]

$$p = Q\left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}}\right) = Q(\sqrt{2}h), \quad (3.3)$$

где h – корень отношения энергий сигнала (E) и помехи (N_0), определяемое из выражения

$$h^2 = \frac{E}{N_0}; \quad (3.4)$$

Q – гауссов интеграл ошибок, определяемый через функцию Крампа $\Phi(x)$:

$$Q(x) = 0,5(1 - \Phi(x)); \quad (3.5)$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.6)$$

В остальных случаях, при $\Delta\varphi \neq 0$, вводится временной коэффициент взаимной корреляции между сигналами $\rho = \cos(\Delta\varphi)$, а вероятность ошибки будет определяться в соответствии с формулой [84]

$$p = Q\left(\sqrt{\frac{(1 - \rho)E}{N_0}}\right). \quad (3.7)$$

Анализ по рассмотренному выше методу показал, что расстройка в фазе на 10% приводит к потере достоверности на 12%, а расстройка фазы на 30% приводит к потере качества на 67%. Отсюда следует, что наиболее уязвимым звеном в

цифровой системе передачи является именно фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ).

На рисунке 3.2 приведена вероятность появления ошибочного бита для бинарных систем нескольких типов и приняты следующие обозначения: FSK – частотная манипуляция, PSK – фазовая манипуляция, DPSK – дифференциальная фазовая манипуляция.

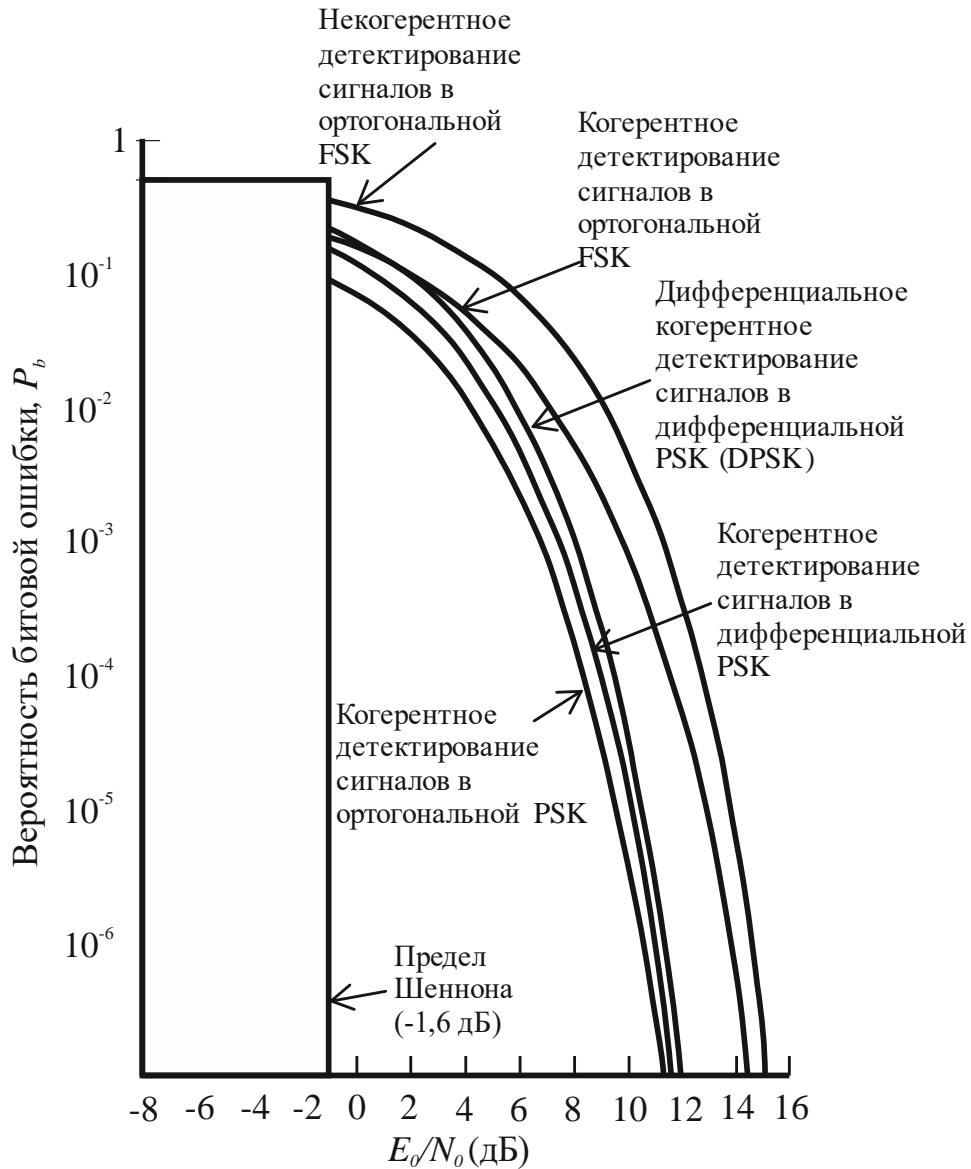


Рисунок 3.2 – Вероятность появления ошибочного бита для бинарных систем нескольких типов

Для создания более устойчивых систем приема цифровых сигналов с фазовой модуляцией целесообразно рассмотреть эволюцию фазы в более детальном представлении, которое дается уравнением Стратоновича [88].

Поскольку фаза является случайным марковским процессом, то ее наиболее полное описание представляется апостериорной плотностью $w(\varphi|z)$ [95].

Наблюдаемая или измеряемая фаза φ входит в сигнал в качестве неэнергетического параметра. Поэтому выходная функция приемника F для такого сигнала определяется выражением [93] в симметризованном виде

$$F(t, \varphi, \hat{\varphi}) = \frac{2}{N_0} z(t, \varphi) s(t, \hat{\varphi}), \quad (3.8)$$

где φ – истинное, но неизвестное значение фазы;

$\hat{\varphi}$ – оценка (или отфильтрованное) значение фазы на приемной стороне.

Строго говоря формула (3.8) не удовлетворяет физическому содержанию, поскольку включает в себя белый шум, всюду или почти всюду имеющий бесконечное значение в любой точке оси времени.

Более корректно, с учетом пункта 1.3.2 главы 1, необходимо представить (3.8) в форме Ито [88]

$$dF(t, \varphi, \hat{\varphi}) = \frac{2}{N_0} dz(t, \varphi) s(t, \hat{\varphi}), \quad (3.9)$$

где dz – дифференциал, содержащий винеровский процесс $W(t)$:

$$dz(t, \varphi) = s(t, \varphi) dt + dW(t). \quad (3.10)$$

Подчеркнем, что винеровский процесс имеет математическое ожидание равное нулю, а дисперсию пропорциональную спектральной плотности и дифференциалу времени dt .

С учетом выражений (1.1) – (1.4) дисперсия дифференциала винеровского процесса равна

$$M[\Delta W^2(t)] = \frac{N_0}{2} \Delta t. \quad (3.11)$$

С учетом представления стохастических дифференциальных уравнений в форме Ито апостериорная плотность w уравнения Стратоновича для фазы будет иметь вид

$$dw(\hat{\varphi}, t|z) = \frac{\partial}{\partial \hat{\varphi}} [A_1(t, \hat{\varphi})w(\hat{\varphi}, t|z)]dt + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \hat{\varphi}^2} [A_2(t, \hat{\varphi})w(\hat{\varphi}, t|z)]dt + [dF - \overline{F(t, \hat{\varphi})}]w(\hat{\varphi}, t|z), \quad (3.12)$$

где A_1 и A_2 – коэффициенты сноса и диффузии.

В таком виде уравнения для своего решения требуют учета весьма необычных свойств шумов, что при моделировании может дать погрешности.

Поэтому Стратоновичем была предложена модель интегрирования стохастических дифференциальных уравнений в симметризованном виде. В отличие от интеграла Ито при вычислении интегральных сумм берутся значения интегрируемой функции Φ в середине элементарных отрезков времени, т.е.

$$\text{l. i. m.}_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} \Phi \left(\frac{v(t_{i+1}) + v(t_i)}{2}, \frac{t_{i+1} + t_i}{2} \right) [v(t_{i+1}) - v(t_i)] = \int_{t_0}^{t_1} \Phi(v(t), t) dv. \quad (3.13)$$

Такое представление позволяет обращаться с диффузионными процессами как с обычными гладкими функциями, как будто они являются гладкими, а не шероховатыми.

Учитывая выше сказанное уравнения для апостериорной плотности фазы (3.12) может быть преобразовано к виду

$$\frac{\partial}{\partial t} w(\varphi|z) = \frac{\partial}{\partial \varphi} [A_1(t, \varphi)w(\varphi|z)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} [A_2(t, \varphi)w(\varphi|z)] + \rightarrow \\ \rightarrow + [F(t, \varphi) - \overline{F(t, \varphi)}]w(\varphi|z), \quad (3.14)$$

где для упрощения записи зависимость функции w от времени не указывается, а оценка фазы $\hat{\varphi}$ записывается без диакритического знака.

В некоторых источниках [93, 108] выходной эффект приемника $F(t, \varphi)$ определяется как производная логарифма функции правдоподобия:

$$F(t, \varphi) = \frac{d}{dt} \ln w(\varphi|z), \quad (3.15)$$

Скорость изменения апостериорной плотности вероятности (АПВ) складывается из трех существенно разных факторов. Первое слагаемое в правой части уравнения представляет собой регулярное движение фазы и имеет характер

«сноса». Второй фактор отражает случайный характер движения фазы и описывается коэффициентами диффузии. Третий фактор в обобщенном виде можно трактовать как апостериорную составляющую и в математическом плане является логарифмом функции правдоподобия.

Таким образом давая общую характеристику этому уравнению можно сделать вывод, что данное дифференциальное уравнение является стохастическим дифференциальным уравнением в частных производных.

Существенной чертой этого уравнения является его нелинейность. Даже при наличии амплитудной модуляции и линейном характере флуктуации фазы апостериорная плотность все равно описывается нелинейным дифференциальным уравнением, в силу наличия в этом уравнении произведения апостериорной плотности в третьем члене.

Для решения данного уравнения можно применить стандартные конечно-разностные сеточные методы [39, 40, 41, 62, 85, 99, 111]. Однако, применение этих методов для уравнений в пространстве более двух измерений наталкивается на непреодолимые вычислительные сложности.

3.2 Повышение устойчивости синхронизации к наведенным помехам в цифровых устройствах управления электротехническими комплексами

В работах, посвященных новым принципам синхронизации [24, 32, 59, 98], отражается принцип коллективного взаимодействия множества различных генераторов опорных фаз, поддерживающих более высокую стабильность и независимость к обрывам в канале. Наиболее ярким (продуманным) представляется работа [38], в которой решение уравнения Стратоновича находится на основе использования синергетических концепций и явления самоорганизации.

Обобщением уравнения Стратоновича на многоагентную сеть является уравнение, в котором каждый i -тый агент описывается уравнением

$$\frac{\partial w_i(x, t)}{\partial t} = L_x[w_i(x, t)] + [F_i(x, t) - Mps(F_i(x, t))]w_i(x, t), \quad (3.16)$$

где i – индекс, указывающий номер агента, $i = 1, 2, \dots, M$;

M – количество агентов в популяции;

L_x – оператор Колмогорова-Фоккера-Планка

$$L_x = -\frac{\partial}{\partial x} K_1(x, t)[\cdot] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} K_2(x, t)[\cdot]; \quad (3.17)$$

$K_1(x, t)$ – коэффициент сноса;

$K_2(x, t)$ – коэффициент диффузии;

$w_i(x, t)$ – АПВ;

$F_i(x, t)$ – функция Стратоновича

$$F_i(x, t) = \frac{1}{N_0} [2\zeta_i(t)s_i(x, t) - s_i^2(x, t)]; \quad (3.18)$$

N_0 – спектральная плотность шума, воздействующего на сигнал;

$\zeta_i(t)$ – смесь математического ожидания i -той плотности и шума;

$s_i(x, t)$ – прогнозируемый сигнал i -тым агентом;

$Mps(t)$ – среднее выходного эффекта

$$Mps(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_i(x, t)w_i(x, t)dx. \quad (3.19)$$

Суть предлагаемого подхода представлена на рисунке 3.3, где АПВ складывается из M -того количества локально-гауссовских плотностей. Каждая из этих плотностей (агенты) описывается параметром сдвига m_i [93].

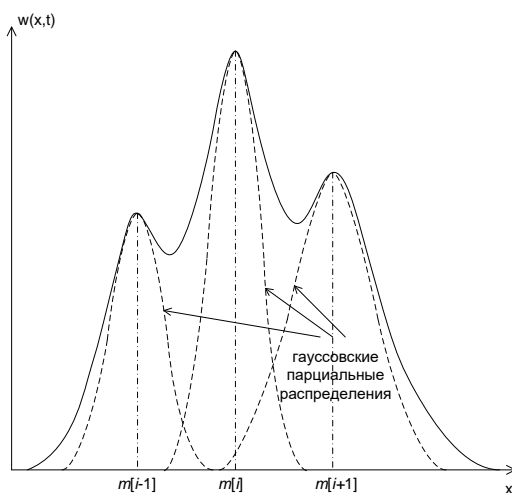


Рисунок 3.3 – К пояснению принципа самоорганизации

На рисунке 3.4 приведена структурная схема многоагентной сети, на которой под ГТЧ обозначен генератор тактовой частоты.

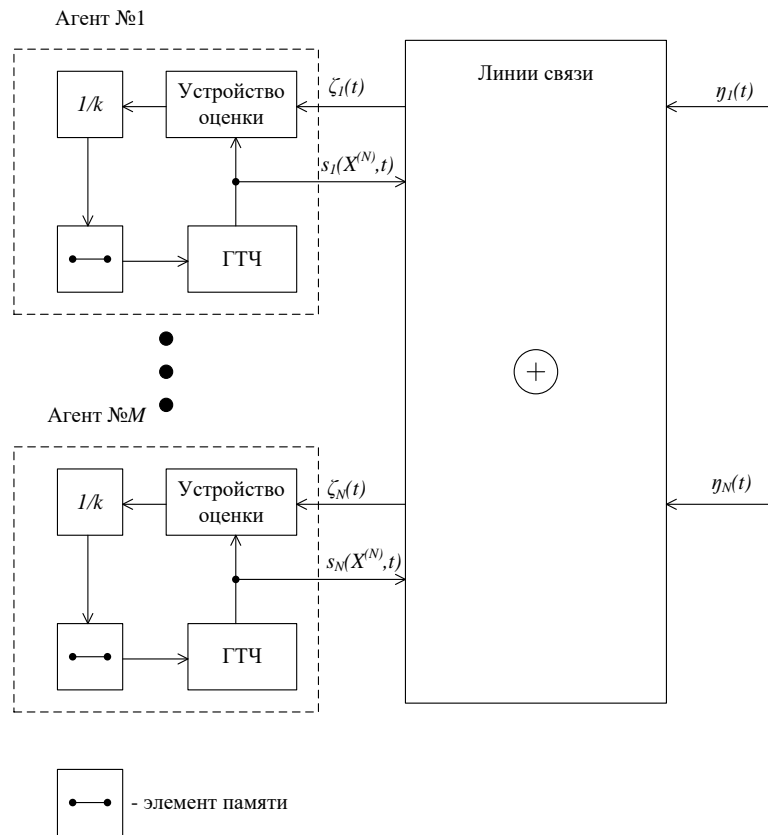


Рисунок 3.4 – Структурная схема многоагентной сети

Для марковского гауссовского процесса, описываемого стохастическим дифференциальным уравнением [34, 69, 93]

$$\frac{db}{dt} = -ab(t) + \alpha N_1(t), \quad (3.20)$$

где $N_1(t)$ – белый гауссовский шум (порождающий процесс) с нулевым средним значением $\overline{N_1(t)} = 0$ и односторонней спектральной плотностью мощности N_1 , можно принять:

$$A_1(t, \hat{b}) = -ab(t), \quad (3.21)$$

$$A_2(t, \hat{b}) = \frac{1}{2} N_1, \quad (3.22)$$

тогда уравнения для плотности вероятности можно без потери точности представить в виде двух обычных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{b}(t)}{dt} &= -\alpha\hat{b}(t) + k(t) \frac{\partial F(t, \hat{b})}{\partial \hat{b}}; \\ \frac{d}{dt} k(t) &= -2\alpha k(t) + \frac{1}{2} N_1 + k^2(t) \frac{\partial^2 F(t, \hat{b})}{\partial \hat{b}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Эти агенты связаны через коммутационный блок друг с другом, на основе концепции близкодействия. Поэтому несмотря на относительную независимость каждого из агентов тем ни менее они влияют опосредованно все друг на друга.

Рассмотрим идею работы этого коллективного «организма». Поскольку каждый из них может быть представлен некоторой точкой в пространстве фаз, то они покрывают достаточно приличный объем этого пространства. При наличии сигнала, отображаемого в этом пространстве так же точкой, какой-то, скажем n -ный, агент окажется наиболее близким к данному сигналу по фазе. В результате обратной связи этот агент начнет «подтягиваться» к указанному ранее сигналу. Затем к нему аналогично будет подтягиваться другой агент и так двигаясь друг за другом они в конце концов плотно накроют область истинного положения фазы, заключенного в сигнале $y(t)$.

Теперь представим, что наведенные токи выбрасывают принимаемый сигнал $y(t)$ из этой области достаточно далеко. Традиционная схема синхронизации в этом случае перестает работать, и соответствующая цифровая система передачи перестает функционировать. Однако в нашем случае выброс $y(t)$ приведет на некоторое время так же к срыву синхронизации и диффузионному движению агентов из ареала скопления в более протяженную область, которая рано или поздно, расширяясь накроет $y(t)$ и теперь какой-то из других агентов окажется вблизи этой точки и процесс стягивания к принятому сигналу повторится вновь. Таким образом эта система явно более устойчива к влиянию наведенных токов чем стандартная традиционная.

При полной потере сигнала «расплывание» коллективного «роя» фаз будет происходить достаточно медленно, пропорционально корню из t , где t – время от момента потери сигнала.

3.3 Представление уравнения Стратоновича в виде совокупности агентов

Уравнение Стратоновича описывает плотность вероятности в N -мерном Евклидовом пространстве, эволюционирующем во времени. Эта плотность вероятности меняется под действием входного сигнала, поскольку она является апостериорной. В связи с тем, что плотность вероятности обладает свойством положительности и может быть получена путем наложения нескольких стандартных плотностей, нормированных к определенной единой величине, например, $1/M$, где M – количество парциальных плотностей, то возможно представление

$$ws(x, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp \left\{ \frac{-(x - z_i(t))^2}{2D} \right\}, \quad (3.24)$$

где $ws(x, t)$ – апостериорная суперпозиционная плотность.

Каждая парциальная плотность имеет стандартный гауссовский характер. Обычно полагается D величиной постоянной, которая находится в результате вычислительных экспериментов исходя из следующих соображений. Чем больше D , тем больше область взаимного влияния, но меньше точность оценки и наоборот.

С точки зрения вероятностных характеристик каждый приемник вычисляет часть (порцию) плотности вероятности, при этом D – это парциальная дисперсия нормального распределения $w(x)$

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp \left\{ \frac{-(x - m(t))^2}{2D} \right\}, \quad (3.25)$$

где $m(t)$ – параметр сдвига парциальной плотности.

В результате подстановки суммы парциальных плотностей (3.25) в уравнение Стратоновича и последующей проекции полученных выражений на отдельные z_j агенты получается следующее выражение [38]:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = S_1 \sum_{j=1}^M \left\{ \left[K_1(z_j, t) + K'_1(z_j, t)(z_1 - z_j) + \frac{K_2(t)}{2m} \left(\frac{z_1 - z_j}{D} \right) + DF'(z_j, t) \right] U(z_1, z_j, D) \right\}, \\ \vdots \\ \dot{z}_i = S_i \sum_{j=1}^M \left\{ \left[K_1(z_j, t) + K'_1(z_j, t)(z_i - z_j) + \frac{K_2(t)}{2m} \left(\frac{z_i - z_j}{D} \right) + DF'(z_j, t) \right] U(z_i, z_j, D) \right\}, \\ \vdots \\ \dot{z}_K = S_K \sum_{j=1}^M \left\{ \left[K_1(z_j, t) + K'_1(z_j, t)(z_K - z_j) + \frac{K_2(t)}{2m} \left(\frac{z_K - z_j}{D} \right) + DF'(z_j, t) \right] U(z_K, z_j, D) \right\}. \end{cases} \quad (3.26)$$

где $U(z_i, z_j, D)$ – функция связи между агентами.

Рассмотрим поведение полученной популяции агентов с точки зрения явления самоорганизации. Как видно из (3.26) параметр D играет существенную роль в проецировании значений парциальных плотностей на i -тую компоненту всех остальных агентов, начиная с 1 по M -тый. Таким образом какой-то из этих агентов неизбежно, рано или поздно, окажется в ближайшей окрестности сигнала, например, в окрестности q -того агента. Тогда вес составляющей U в уравнении этого агента будет наибольшим по сравнению с остальными. Следовательно, z_q начинает возрастать, и остальные агенты, находящиеся на небольшом удалении от агента q -того будут воспринимать это путем увеличения соответствующего U . В итоге все эти парциальные плотности будут дрейфовать в направлении истинного положения сигнала и тем самым увеличивается плотность в точке, где находится истинный сигнал, и уменьшается в других окрестностях.

Рассмотрим влияние двух факторов – наличие шума в канале и динамики сигнала. При действии шума в канале расстояние между z_q и остальными будет неизбежно увеличиваться и соответственно будет возникать явление диффузии, т.е. разбегание агентов от истинного значения. Чем больше шум, тем больше эта тенденция. При уменьшении шума диффузия будет убывать. Кроме того, наличие шума приводит не только к увеличению дисперсии АПВ, но и ее смещению относительно истинного значения.

Теперь рассмотрим влияние динамики сигнала. Предположим, что АПВ расположена в точке близкой к истинному значению. Пусть сигнал теперь переместился, к примеру, влево относительно этой точки (при одномерном варианте), тогда в силу инерционности всей системы реакция совокупности этих

элементов непременно будет запаздывать, поэтому часть агентов будет отставать от изменения сигнала. Следовательно, дисперсия АПВ возрастает, однако, одновременно с этим какой-то из агентов непременно окажется ближе к сигналу и тогда возникнет ситуация концентрации агентов вблизи сигналов.

Таким образом мы видим две взаимопротиворечивых тенденции эволюции. Одна состоит в увеличении дисперсии АПВ, другая в уменьшении ее.

3.4 Натурное моделирование совокупности агентов

Математическое моделирование в соответствии с алгоритмом, проведенным в [38], показало, что при определенных условиях (отношение сигнал-шум, соответствующее D , количество агентов, размерность пространства сигналов и т.д.) алгоритм сходится и дает хорошие результаты, причем наблюдается устойчивость к другим видам воздействий, типа импульсных помех, мультипликативных помех.

Однако натурное моделирование с использованием реальных устройств и шумов автором концепции самоорганизации [38] произведено не было. Поэтому возникают задачи проверки предлагаемых алгоритмов на функционирование в реальных условиях, оценка сходимости совокупности агентов к некоторому значению и проверка стабильности генераторов.

Для решения поставленных задач проведено экспериментальное исследование [58] работы генераторов гармонических колебаний при их взаимной синхронизации и произведено сравнение результатов с широко распространенным способом синхронизации генераторов с помощью одного высокостабильного задающего генератора с использованием системы ФАПЧ, описанного в [71, 75, 103, 104].

На рисунке 3.5 представлена структурная схема системы из трех генераторов, иллюстрирующая способ синхронизации с применением задающего генератора (Г3), который является ведущим, и двух ведомых генераторов – (Г1) и (Г2). Каждый из ведомых генераторов вводится в синхронизм с (Г3) с помощью своей индивидуальной системы ФАПЧ, которая состоит из фазового детектора (ФД),

усилителя постоянного тока (УПТ) и элементов управления (ЭУ), входящих в состав колебательного контура генератора и изменяющих его резонансную частоту.

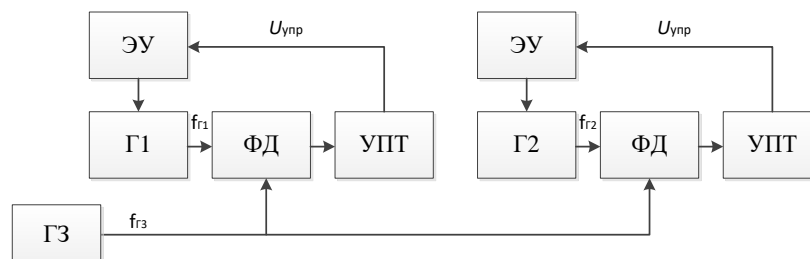


Рисунок 3.5 – Синхронизация генераторов Г1 и Г2 с помощью задающего генератора Г3

При синхронной работе частоты колебаний, генерируемые генераторами, равны

$$f_{Г1} = f_{Г2} = f_{Г3}. \quad (3.27)$$

Разности фаз также равны и являются постоянной величиной

$$\varphi_{Г3} - \varphi_{Г1} = \varphi_{Г3} - \varphi_{Г2} = \text{const}, \quad (3.28)$$

Нестабильность частоты генерации каждого из генераторов определяется нестабильностью ведущего генератора

$$\sigma_{Г3} = \sigma_{Г1} = \sigma_{Г2}. \quad (3.29)$$

Схема на рисунке 3.5 использовалась для экспериментального определения полосы захвата и полосы удержания каждого из исследуемых генераторов.

Для этого ведущий генератор Г3 перестраивался в диапазоне частот, близком к центральной частоте генерации исследуемого в данный момент ведомого генератора и фиксировались частоты в моменты появления синхронизма и выхода из него.

Помимо этого, основным направлением произведенных экспериментальных исследований являлось явление самоорганизации сети состоящей из генераторов в которой нет ведущего, что по своей сути есть продолжение исследований, представленных в [38, 39, 40, 41, 82].

Ранее в пунктах 3.2 и 3.3 подробно рассматривалось явление самоорганизации на основе представления [38].

В ходе экспериментов исследовалась кратковременная стабильность частоты колебания двух и трех взаимно синхронизированных генераторов. Схемы включения генераторов представлены на рисунках 3.6 и 3.7.

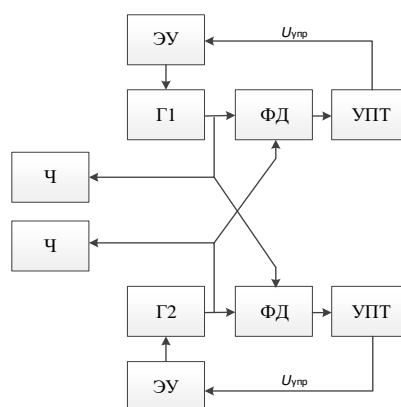


Рисунок 3.6 – Взаимная синхронизация двух генераторов Г1 и Г2

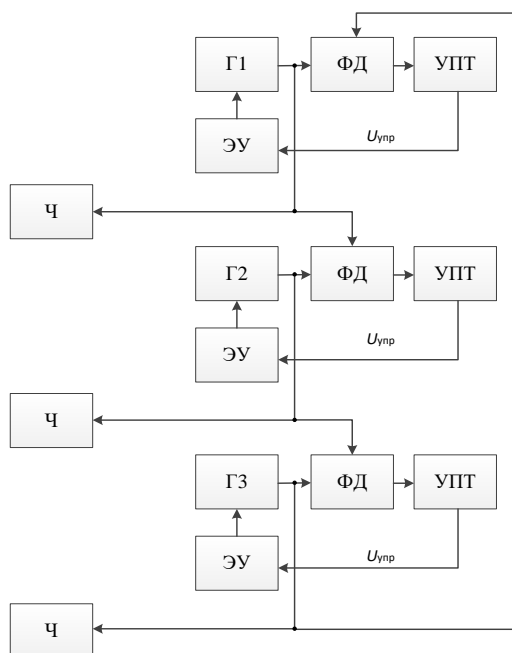


Рисунок 3.7 – Взаимная синхронизация трех генераторов Г1, Г2 и Г3

Обозначения на схемах те же, что и на рисунке 3.5, но все генераторы являются равноправными. На схемах показаны частотомеры (Ч), включенные для фиксации режима синхронной работы и контроля частоты генерации. В

экспериментах использовались одинаковые генераторы с ФАПЧ. Принципиальная электрическая схема одного из них представлена на рисунке 3.8.

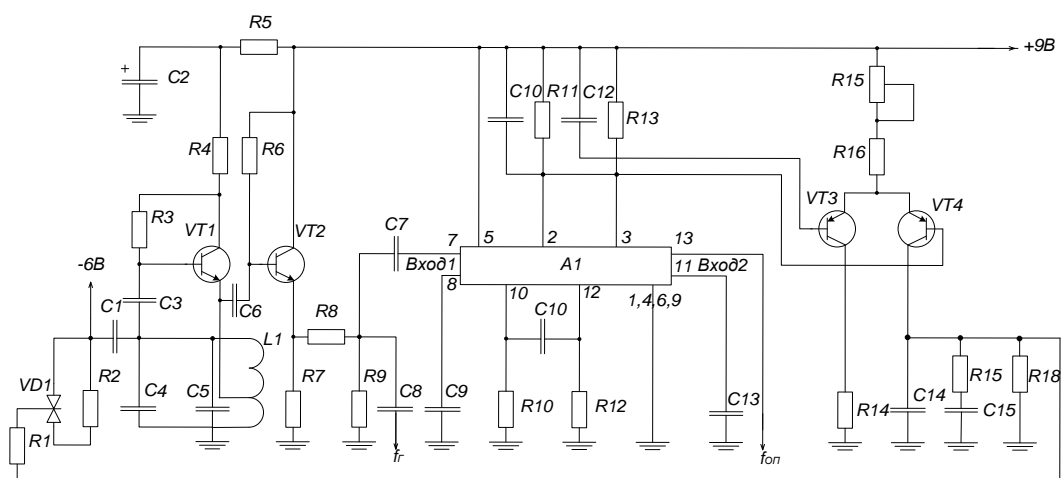


Рисунок 3.8 – Схема генератора гармонических колебаний с ФАПЧ

Генератор выполнен на транзисторе $VT1$, а буферный каскад на $VT2$. ФД выполнен на микросхеме $A1$ типа $K174ПС1$. Схема ФД взята из справочника [2]. На первый вход $A1$ через конденсатор $C7$ поступают сигналы с выхода буферного каскада, а на второй вход $A1$ сигналы от другого генератора, являющего для рассматриваемого генератора опорным (задающим). Напряжение, пропорциональное разности фаз обоих генераторов, интегрируется элементами $C10$, $R11$, $C12$, $R13$, усиливается УПТ на транзисторах $VT3$, $VT4$. Затем снова интегрируется цепью $C14$, $R17$, $C15$ с большим временем интеграции и подается на варикап $VD1$, играющий роль ЭУ. Сигнал с выхода буферного каскада, кроме того, через конденсатор $C8$ поступает на ФАПЧ другого взаимно синхронизируемого генератора, являясь для него опорным.

Значения частоты генерируемых сигналов в эксперименте измерялись частотомерами с периодом в 1 с. В каждом опыте проводилось 50 измерений. Результаты измерений сведены в таблицы 3.1 – 3.5. По результатам измерений рассчитывалось среднеквадратическое отклонение частоты генерации от среднего значения. При этом полагалось, что каждые 50 измеренных значений представляют собой реализацию эргодического стационарного процесса и поэтому для

определения среднеквадратического отклонения σ могут быть использованы формулы

$$\sigma = \sqrt{D^2}, \quad (3.30)$$

где D^2 – дисперсия,

$$D^2 \cong \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [f_i - m_f]^2; \quad (3.31)$$

m_f – математическое ожидание,

$$m_f \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i; \quad (3.32)$$

n – количество измерений в одной реализации;

f_i – значение частоты в i -том измерении.

Таблица 3.1 – Результаты измерений частоты генерации одного из генераторов. Период измерений – 1 с, частота выражена в кГц

1211,534	1211,389	1211,301	1211,190	1211,075
1211,492	1211,369	1211,303	1211,180	1211,090
1211,480	1211,376	1211,290	1211,176	1211,065
1211,465	1211,359	1211,285	1211,166	1211,073
1211,456	1211,356	1211,270	1211,161	1211,082
1211,444	1211,348	1211,244	1211,162	1211,076
1211,440	1211,351	1211,223	1211,179	1211,067
1211,420	1211,334	1211,217	1211,147	1211,045
1211,415	1211,317	1211,189	1211,124	1211,037
1211,387	1211,297	1211,209	1211,119	1211,041

Среднеквадратическое отклонение от среднего значения частоты генерации в этом случае рассчитано по формулам (3.30 – 3.32) и составляет 138 Гц или 11,39 %.

Таблица 3.2 – Результаты измерения частоты генерации двух генераторов, включенных по схеме рисунку 3.6. Эксперимент 1, период измерений – 1с, частота выражена в кГц

1208,312	1208,324	1208,305	1208,403	1208,420
1208,300	1208,333	1208,308	1208,459	1208,425

Продолжение таблицы 3.2

1208,304	1208,336	1208,320	1208,476	1208,429
1208,307	1208,305	1208,324	1208,461	1208,419
1208,317	1208,297	1208,333	1208,454	1208,395
1208,315	1208,289	1208,334	1208,443	1208,342
1208,322	1208,293	1208,304	1208,434	1208,260
1208,317	1208,292	1208,188	1208,438	1208,220
1208,327	1208,291	1208,177	1208,430	1208,177
1208,320	1208,305	1208,444	1208,426	1208,160

Таблица 3.3 – Результаты измерений частоты генерации двух генераторов, включенных по схеме рисунку 3.6. Эксперимент 2

1208,155	1208,150	1208,139	1208,142	1208,051
1208,153	1208,158	1208,135	1208,135	1208,039
1208,159	1208,153	1208,156	1208,134	1208,037
1208,181	1208,145	1208,135	1208,113	1207,980
1208,160	1208,141	1208,138	1208,073	1207,981
1208,165	1208,145	1208,140	1208,056	1207,999
1208,168	1208,145	1208,142	1208,065	1207,973
1208,163	1208,143	1208,139	1208,086	1207,964
1208,157	1208,141	1208,149	1208,075	1207,952
1208,153	1208,139	1208,146	1208,080	1207,966

Среднеквадратическое отклонение в эксперименте 1 составляет 83 Гц, в эксперименте 2 – 63,7 Гц или 6,87% и 5,27% соответственно.

Таблица 3.4 – Результаты измерения частоты генерации трех генераторов, включенных по схеме рисунку 3.7. Эксперимент 1, период измерений – 1 с, частота выражена в кГц

1211,351	1211,394	1211,318	1211,349	1211,400
1211,355	1211,366	1211,316	1211,356	1211,499
1211,362	1211,357	1211,318	1211,372	1211,402
1211,350	1211,357	1211,319	1211,381	1211,419
1211,351	1211,359	1211,311	1211,385	1211,426
1211,362	1211,351	1211,319	1211,395	1211,427
1211,361	1211,348	1211,327	1211,363	1211,437
1211,362	1211,339	1211,338	1211,376	1211,438
1211,368	1211,327	1211,344	1211,372	1211,437
1211,374	1211,320	1211,346	1211,384	1211,439

Среднеквадратическое отклонение в этом эксперименте составляет 37,5 Гц или 3,1%.

Таблица 3.5 – Результаты измерений частоты генерации трех генераторов.

Эксперимент 2.

1211,463	1211,436	1211,398	1211,464	1211,444
1211,470	1211,447	1211,419	1211,465	1211,431
1211,465	1211,450	1211,426	1211,468	1211,440
1211,464	1211,446	1211,421	1211,485	1211,455
1211,463	1211,439	1211,422	1211,482	1211,456
1211,460	1211,422	1211,432	1211,470	1211,465
1211,454	1211,411	1211,431	1211,458	1211,473
1211,455	1211,395	1211,440	1211,449	1211,484
1211,452	1211,390	1211,443	1211,447	1211,485
1211,447	1211,382	1211,464	1211,450	1211,478

Среднеквадратическое отклонение в этом эксперименте составляет 29 Гц или 2,39%.

3.5 Выводы по главе

1. Наиболее помехоустойчивым является фазовая модуляция в случае флуктуационных помех. Этот факт хорошо известен, однако, практический опыт воздействия наведенных влияний подтверждает, что и в этом случае фазовая модуляция является наиболее устойчивой.

2. Все цифровые системы передачи информации органически содержат в своем составе систему фазовой синхронизации и поэтому вопросы устойчивости работы цифровых систем в первую очередь упирается в устойчивость работы фазовой или тактовой синхронизации.

3. В эксперименте использовались весьма нестабильные генераторы без температурной, кварцевой и других видов стабилизации для подтверждения гипотезы об увеличении стабильности при использовании явления самоорганизации взаимосвязанных генераторов.

4. Стабильность частоты взаимно синхронизируемых генераторов оказывается выше стабильности одного генератора и увеличивается по мере увеличения числа синхронизируемых генераторов. При исследовании взаимной синхронизации двух генераторов с нестабильностью 11% каждый, итоговая

нестабильность снижается до 5-7%, а при включении трех – до 2-3%. Эти экспериментальные исследования являются прямым подтверждением наличия явления самоорганизации в системе связанных генераторов.

4 СИНТЕЗ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

4.1 Алгоритмы выбора систем защиты

Для существующих и вновь проектируемых железнодорожных участков рекомендуется использовать эвристический подход к обеспечению мер защиты линий управления и телекоммуникаций от электромагнитных влияний тяговых сетей. Соответственно в настоящее время целесообразно проводить анализ текущей и прогнозируемой обстановки в сфере ЭМС на каждом конкретном участке и выбирать из нескольких вариантов обеспечения безопасности наиболее подходящий.

В качестве возможных вариантов можно выделить следующие:

- применение исключительно существующего принципа обеспечения защиты, основанного на пассивных мерах защиты;
- применение перспективных принципов, в частности активных мер защиты, в дополнение к существующему.

Под активной защитой подразумевается некоторая система, включающая активное подавление наводимых влияний только в требуемые моменты времени и осуществляющая пассивный контроль текущего состояния во все остальные.

При этом возникает логичный ряд вопросов, требующих разрешения, среди которых выделяются следующие: по какому критерию разделять участки и методы их защиты, по какому критерию выбирать моменты включения и моменты выключения, какова необходимая сила срабатывания активной защиты.

Соответственно, в качестве критериев для классификации участков выступают интенсивности движения и, как следствие, наводимые уровни влияний. Чем они выше и чем важнее исследуемый участок, тем надежнее и эффективнее должна быть система защиты.

Для определения моментов срабатывания активной системы так же логично использовать уровни влияния. Однако, для установления порогов требуется

предварительно определить законы распределения наводимых токов и соотнести их значения с уровнями опасности.

Для определения законов распределения производится экспериментальный сбор статистических данных об величинах наводимых токов и их последующая обработка с применением методов статистической вероятности.

Сила срабатывания активной защиты должна варьироваться в зависимости от текущего значения наведенного тока в широком диапазоне. Ожидаемым результатом срабатывания является снижение результирующего уровня воздействия, как минимум, до безопасных величин.

При этом может возникнуть ситуация, когда было принято не верное решение, приведшее в свою очередь к необоснованным затратам.

Для пояснения примем за A ситуацию выбора варианта защиты на существующих пассивных методах защиты. Тогда вероятность выхода из строя оборудования в этом случае обозначим как p_A , а экономические затраты на организацию данного варианта как K_A . В качестве ситуаций B и C возьмем вариант установки активной системы защиты, причем в случае B будем считать, что была выбрана заниженная чувствительность системы включения, а в случае C наоборот завышенная. Тогда, соответственно, получаем вероятности выхода из строя оборудования p_B и p_C , и экономические затраты на организацию и функционирование (включения) систем K_B и K_C .

Причем при выполнении условия нормального функционирования активной системы защиты будет наблюдаться следующая закономерность:

$$p_C < p_B < p_A, \quad (4.1)$$

но при этом, так как, в случае C ожидается гораздо больше срабатываний, чем в B , то

$$K_A < K_B < K_C. \quad (4.2)$$

Однако, при выходе из строя оборудования во всех трех, рассматриваемых случаях, появляются дополнительные затраты на ремонт и восстановление. Примем эти затраты в размере K_R .

Так для случая A получаем, что система нормально функционирует с вероятностью $(1 - p_A)$, затрачивая при этом K_A и с вероятностью p_A может произойти авария с затратами K_R . Итого получаем средневзвешенные экономические затраты варианта A , равные

$$S_A = (1 - p_A) K_A + p_A K_R. \quad (4.3)$$

Аналогично определяем S_B и S_C .

Таким образом оказывается возможным получить некоторый экономический критерий выбора системы защиты для рассматриваемого участка на основе сравнения финансовых затрат S , необходимых для различных вариантов.

Данная модель хорошо показывает общий принцип выбора системы защиты из возможных вариантов, однако, на практике нереализуема ввиду сложности определения вероятностей отказов и требует более детальной проработки.

4.2 Статистическая обработка результатов измерений

4.2.1 Как говорилось ранее, для определения эффективных уровней и силы срабатывания активной системы защиты необходимо провести статистическую обработку результатов измерений. Однако, статистическая обработка сама по себе является не тривиальной задачей. В результате статистической обработки необходимо получить хорошо зарекомендовавшие себя на практике величины, функции и термины, например, вероятность превышения током определенного порога – функцию распределения, или среднее значение наведенного тока – математическое ожидание, либо разброс – дисперсию тока относительно среднего значения, функцию плотности вероятности, корреляционную функцию и т.д. [50, 51].

Эти и другие характеристики случайных явлений в теории получаются как результат предельного перехода количества измерений в бесконечность. Практически же результаты измерений всегда имеют ограниченный объем, по которому определить значение вероятности невозможно. Поэтому необходимо

найти оценки этих параметров и характеристик, наиболее приближающихся к предельным [50, 51, 68, 72].

Если следовать традиционным путем для построения функции распределения, то эта функция распределения будет иметь многоступенчатый вид. Высота каждой ступеньки будет определяться количеством измерений, т.е. $1/N$, где N – число измерений, а ширина – разницей между смежными значениями токов, вариационного ряда измеренных значений [50].

Использование такой функции распределения для подсчета плотности вероятности имеет сингулярный характер, что является весьма неудобным при практических вычислениях.

С другой стороны, построение плотности на основе гистограммного метода влечет за собой так же ступенчатый характер этой плотности, однако в отличие от функции распределения при увеличении количества измерений $N \rightarrow \infty$ высота ступенек убывает, а ширина ступенек остается величиной, независящей от количества измерений, т.к. они задаются экспериментатором, что влечет к появлению дополнительных ошибок.

Таким образом видно, что для практических измерений необходимо иметь оценку плотности и функцию распределения, обладающие определенной степенью гладкости и при этом в пределе при $N \rightarrow \infty$ стремящиеся к истинным функциям распределения и плотности.

Для согласования этих двух противоречивых требований необходимо построить функционал, который бы минимизировал ошибки как для функции распределения, так и для плотности вероятности.

4.2.2 Непараметрическое определение законов распределения.

В настоящий момент существует несколько различных способов для определения законов распределения.

Классическим методом является поиск подходящего параметрического уравнения из известных и подбор его характеристик для лучшего приближения получаемых решений к экспериментальным данным.

Попытки поиска классическим методом показали, что использование типовых законов распределения не позволяет подобрать характеристики, отвечающие требованиям к точности приближения.

Вместе с тем, дополнительно, применение такого подхода осложнено возможным изменением законов распределения исследуемых величин и, главное, некорректностью постановки задачи [94], а именно:

– решение определяется по заведомо приближенным результатам, так как исходные данные получены с помощью измерительной аппаратуры, имеющей собственную погрешность;

– решение задачи не определяется однозначно и может иметь множество равнозначных (или предельно близких) результатов;

– не определяемы начальные условия – известно только состояние системы, в момент принимаемый за начальный. При этом динамика и характер дальнейшего развития не предсказуемы. Вместо этого известно состояние системы в конечный момент времени. Таким образом вместо начальных известны граничные условия.

Приближенное решение некорректно поставленной задачи осуществляется в классе непараметрических уравнений.

Решение таких уравнений сводится к выбору функционала и поиску его экстремума по какому-либо критерию. Для данной задачи был выбран критерий минимума невязки [13].

В качестве исходного выбран следующий функционал:

$$\begin{aligned} \Phi[F(x), \dot{F}(x)] = & \alpha \int_{x_0}^{x_1} (F_e(x) - F(x))^2 dx + \rightarrow \\ \rightarrow & +\beta \int_{x_0}^{x_1} (W_e(x) - \dot{F}(x))^2 dx + \gamma \int_{x_0}^{x_1} (u(x))^2 dx, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где x – величины измеренных значений, $x \in [x_0, x_1]$;

$F_e(x)$ – эмпирическая функция распределения;

$W_e(x)$ – эмпирическая плотность распределения;

$F(x), \dot{F}(x)$ – искомая функция и плотность;

$u(x)$ – регуляризирующее воздействие, реализующее физическую ограниченность внешних влияний на систему и минимизирующее их;

$\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ – весовые коэффициенты.

Роль коэффициентов сводится по Тихонову для трансформации задачи из класса некорректных в класс корректных [94].

Регуляризирующее воздействие задано функцией

$$u(x) = \varphi(x), \quad (4.5)$$

и связано с функцией и плотностью распределения следующими соотношениями:

$$F(x) = \int_{x_0}^x e^{-\varphi(\tau)} d\tau; \quad (4.6)$$

$$\dot{F}(x) = e^{-\varphi(x)}. \quad (4.7)$$

Для задачи определены граничные условия, т.е.:

$$F(x_0) = 0; \quad F(x_1) = 1, \quad (4.8)$$

для любых x_0 и x_1 , причем из $x_1 > x_0$ следует $F(x_1) > F(x_0)$.

Так же существуют физические ограничения для плотности вероятности:

$$\int_{x_0}^{x_1} \dot{F}(\tau) d\tau = 1, \quad (4.9)$$

для любых токов $\dot{F} \geq 0$.

Подставив (4.5, 4.6, 4.7) в функционал (4.4) получаем

$$\begin{aligned} \Phi[\varphi(x)] &= \alpha \int_{x_0}^{x_1} \left(F_e(x) - \int_{x_0}^x e^{-\varphi(\tau)} d\tau \right)^2 dx + \rightarrow \\ &\rightarrow +\beta \int_{x_0}^{x_1} (W_e(x) - e^{-\varphi(x)})^2 dx + \gamma \int_{x_0}^{x_1} (\varphi(x))^2 dx. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Следовательно, задача сводится к минимизации функционала (4.10) с учетом указанных ограничений, т.е. к нахождению его экстремума.

Строго говоря, экстремум функционала находится путем вычисления функциональной производной и приравнивания её к нулю [36]. Обычно в этом

случае получается дифференциальное уравнение типа Эйлера или Эйлера-Лагранжа и т.д [1]. Решая это дифференциальное уравнение при ограничениях (4.8, 4.9) можно найти функцию распределения, а вслед за ней и плотность вероятности. Однако такой подход иногда наталкивается на непреодолимые аналитические сложности. Поэтому произведем перевод функции распределения из Гильбертового бесконечномерного пространства в пространство конечной размерности n , называемое Евклидовым [11, 36, 43]. Этот перевод осуществляется стандартным образом, путем дискретизации функции распределения по аргументу, то есть по токам. Тогда функционал (4.10) превращается в функцию множества переменных:

$$\begin{aligned} \Phi[y_1, y_2, \dots, y_n] &= \alpha \sum_{i=1}^n \left(F_e(x_i) - \sum_{j=1}^i e^{-y_j \Delta x} \right)^2 \Delta x + \rightarrow \\ &\rightarrow +\beta \sum_{i=1}^n (W_e(x_i) - e^{-y_i})^2 \Delta x + \gamma \sum_{i=1}^n y_i^2 \Delta x, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где n – количество точек приближений, $n \rightarrow \infty$;

y_i – значение регуляризирующего воздействия в i -той точке приближения;

Δx – шаг дискретизации диапазона случайных величин.

Экстремум функции множества переменных находится путем ее дифференцирования по каждой из n переменных y_i и приравнивания производных к нулю. В результате получается система нелинейных алгебраических уравнений, решение которой с необходимой точностью можно получить, применив непараметрическую аппроксимацию по методу Ньютона-Рафсона [36, 43] на основе критерия минимума функционала невязки (4.10) [13].

Эмпирические функции распределений F_e и плотности W_e строятся исходя вариационного ряда, определяемого для исследуемого объема измеренных значений. Функция распределения, рассчитывается для всевозможных значений токов как относительная величина количества измерений, не превышающих данное значение к общему объему измерений. В результате получается ступенчатая функция дифференцирование которой дает набор единичных импульсных

функций. Поэтому плотность распределения целесообразно определять в дискретном виде как разницу значений функции распределения, отнесенную к единому, предварительно выбранному, шагу.

В классическом варианте, по полученным дискретным значениям эмпирических функций следует пытаться подобрать распределение из стандартного ряда функций путем проверки гипотез, например, по методу χ^2 . Для этого определяется мера расхождения эмпирических и теоретических частот. Для выбранного уровня значимости α по таблице χ^2 -распределения находят критическое значение. Если фактическое наблюдаемое значение χ^2 больше критического, то гипотеза отвергается. Если меньше, то гипотеза не противоречит исходным данным [51].

Для вычислений по методу Ньютона диапазон возможных значений токов разделяется на n частей. Значения эмпирической функции плотности для разделенных частей перераспределяются и задаются точечными значениями на границах каждого поддиапазона. В этих же точках определяются значения эмпирической функции распределения.

Алгоритм вычислений по методу Ньютона дополнительно требует определения начальной точки приближения. Определим данные точки исходя из соображений, что идеальным решением задачи приближения двух функций, является решение абсолютного равенства исходной и приближаемой функции. Но с практической точки зрения подобное решение бесполезно, так как для дальнейших операций необходима сглаженная кривая, минимально отдаленная от всех точек исходной. Однако, данное предположение позволяет определить начальное решение u^0 с помощью эмпирической плотности распределения и соотношений (4.5 и 4.7).

Метод Ньютона предполагает последовательное приближение к искомому решению системы нелинейных алгебраических уравнений [36]. Для последовательного приближения необходимо вычислить производную от векторных функций векторных аргументов в n -мерном пространстве, которые обычно именуют матрицей Якоби, далее найти обратную матрицу Якоби в данной

точке и вычесть из первой точки приближения произведение обратной матрицы Якоби на вектор-функцию. Таким образом получаем первое приближение. Дальнейшие вычисления осуществляются аналогично.

Следует заметить, что такая процедура не осуществима в случае, если обратная матрица Якоби в расчетной точке не существует. Так же есть возможность появления увеличивающегося расхождения или заикливания приближений. Обычно это происходит, когда некорректно выбирается начальная точка и результат первой итерации не оказывается приближенным к искомому решению.

В случае одномерной функции вещественного аргумента суть метода Ньютона заключена в следующей форме:

$$x_{j+1} = x_j - \frac{f(x_j)}{f'(x_j)}, \quad j = 0, 1, \dots, \quad (4.12)$$

где j – шаг приближения;

x_j – точка, в которой осуществляется приближение;

$f(x_j)$ и $f'(x_j)$ – значение функции и её производной в расчетной точке.

В соответствии с описанным выше процессом, для получения приближенного решения задачи произведена вариация функционала (4.11) по всем аргументам (y_i) и определен его экстремум, т.е. решена система уравнений n -го порядка

$$\left\{ \frac{\partial \Phi[y_1, y_2, \dots, y_n]}{\partial y_i} = 0, \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n. \right. \quad (4.13)$$

Решением системы (4.13) являются значения оптимальных регуляризирующих воздействий y_i в точках приближений, объединяя которые находим оптимальное внешнее регуляризирующее воздействие, полученное по критерию минимума расхождения с учетом введенных ограничений. Далее, с учетом соотношений (4.5, 4.6, 4.7) и произведя нормирование получившихся значений рассчитываем оптимальную функцию $F(x)$ и плотность $\dot{F}(x)$ распределения для проектируемой системы защиты кабельных линий.

Подставив результаты вычислений в (4.4) получаем значение минимума функционала расхождений.

Выполнить проверку верности расчетов можно элементарно с помощью внесения небольшого изменения в любую из полученных функций. Расчет функционала с подстановкой такой функции даст в ответе значение большее, чем при расчете с оптимальными параметрами.

При необходимости, для уменьшения ошибки расхождения можно увеличить количество точек приближения.

Для эффективной статистической обработки результатов необходимо применить подход, дающий целостную и достоверную картину аппроксимированных значений. Ввиду большого объема исходных данных существует известная сложность их одномоментной обработки. Решение этой проблемы дает разделение исходных данных на составные части, последовательная обработка которых несколько усложняет алгоритм, но значительно снижает сложность производимых вычислений.

Результатом вычислений по приведенному алгоритму является набор оптимальных функций, полученных для определенного вариационного ряда, а значит лишь для данного временного поддиапазона. Величины же измеренных значений на разных поддиапазонах, а, следовательно, и разброс их значений может колебаться.

Последующее использование полученных результатов подразумевает необходимость их дальнейшей обработки. Первым шагом которой является нормирование данных. Все полученные функции распределения изменяются в диапазоне от 0 до 1, в соответствии с ограничениями (4.8). Все полученные плотности распределения нормируются в процессе расчетов в соответствии с требованием (4.9). Однако, так как выборки вычисляются при различных диапазонах аргументов, то требуется их преобразование. Реализовать подобное и привести все аргументы функций к диапазону от 0 до 1 поможет следующее выражение нормирования:

$$i^H = \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}. \quad (4.14)$$

4.2.3 Практическая реализация.

В качестве примера по данной методике выполнены расчеты функционала (4.4) в MathCad для части экспериментальных данных при различных вариантах точности.

Таблица 4.1 – Пример повышения точности

Количество точек приближения, n	7	10
Результат вычисления ошибки расхождения, $\Phi[...]$	0.745	0.274

Результаты вычислений при 10 точках приближения и сравнение их с эмпирическими функциями представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

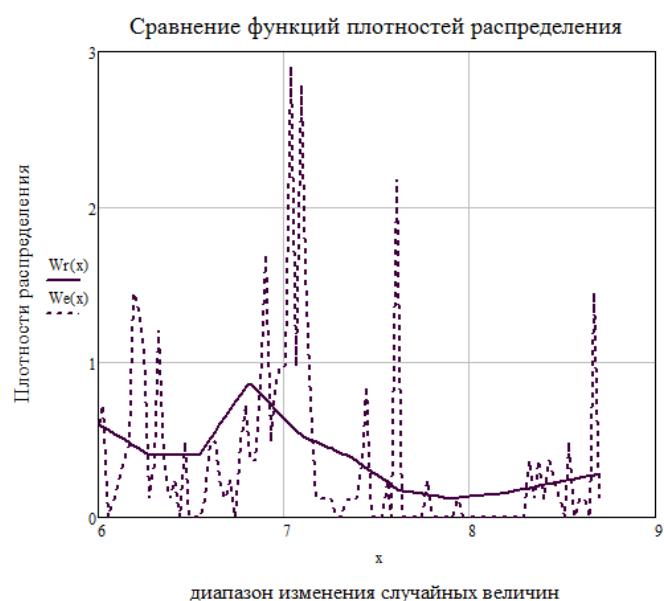


Рисунок 4.1 – Сравнение расчетных и эмпирических функций плотности распределения

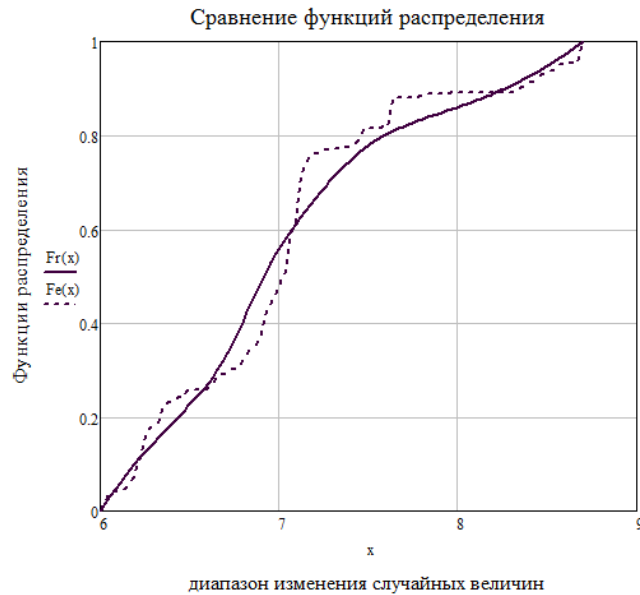


Рисунок 4.2 – Сравнение расчетных и эмпирических функций распределения

На рисунках 4.1 и 4.2 $Fe(x)$ и $We(x)$ – эмпирическая функция и плотность распределения соответственно; $Fr(x)$ и $Wr(x)$ – рассчитанные функции.

Также в качестве примеров из исходных данных выбраны три временных диапазона T по 30 минут, обозначенные как А, Б и В на рисунке 4.3. Для оптимизации по методу Ньютона выбрано количество приближаемых точек n равное 10.

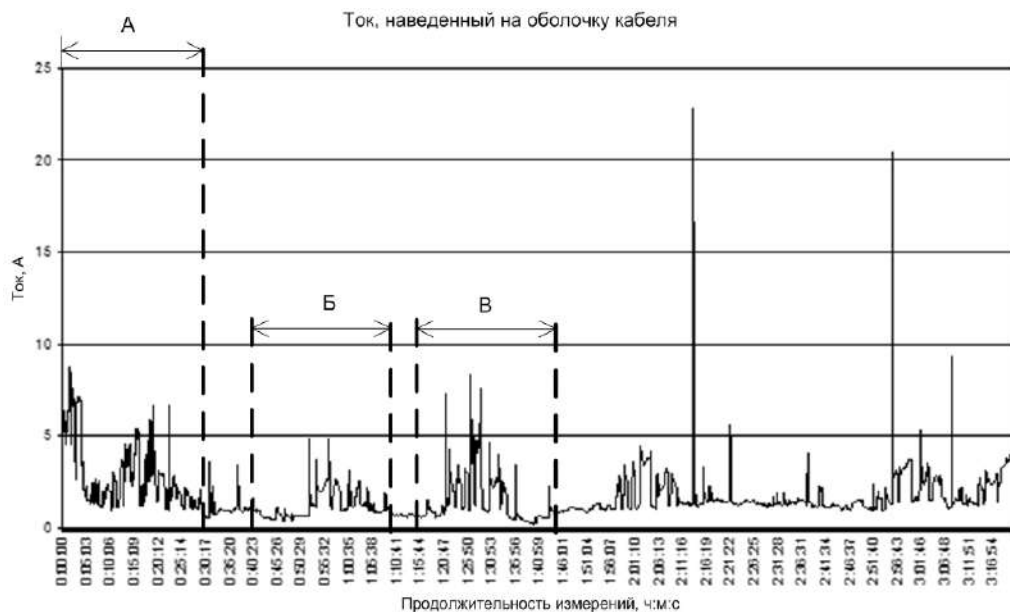


Рисунок 4.3 – Выбранные временные диапазоны из экспериментальных данных

В результате вычислений для диапазона А была найдена оптимальная функция регуляризирующего воздействия и получены функция и плотность распределения, приведенные на рисунках 4.4 и 4.5.

Как видно по рисункам 4.4 и 4.5 полученные функции имеют высокую степень сходимости и соответствуют начальным ограничениям (4.8) и (4.9).

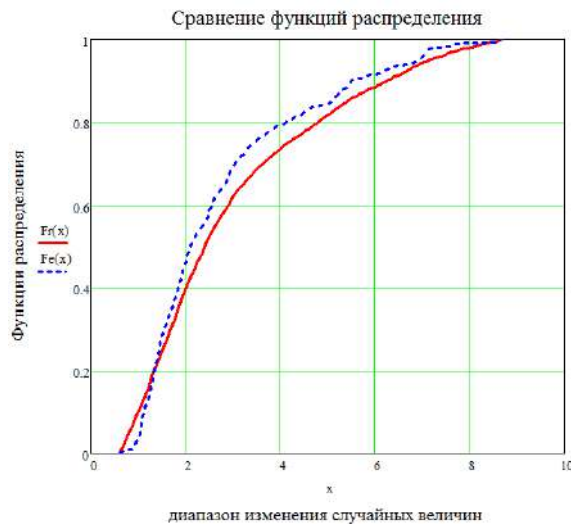


Рисунок 4.4 – Результат вычислений для диапазона А: сравнение функций распределения эмпирической $F_e(x)$ и оптимальной $F_r(x)$

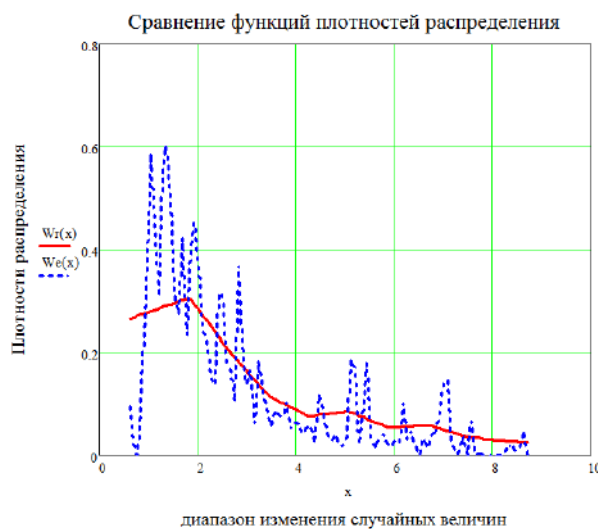


Рисунок 4.5 – Результат вычислений для диапазона А: сравнение гистограммы плотности распределения $W_e(x)$ с рассчитанной оптимальной $W_r(x)$

Осуществив аналогичные вычисления для диапазонов Б и В (рисунок 4.3) и выполнив нормирование всех результатов получаем возможность сравнить их между собой, что приведено на рисунке 4.6.

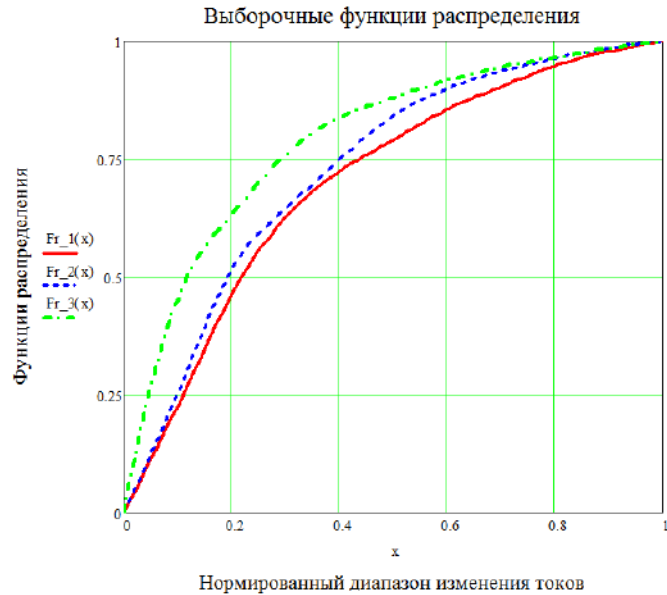


Рисунок 4.6 – Сравнение рассчитанных функций распределения: $Fr_1(x)$, $Fr_2(x)$ и $Fr_3(x)$ – функции распределения для диапазонов А, Б и В соответственно; x – нормированные токи, определяемые формулой (4.14)

Как видно по рисунку 4.6 функции распределения различных диапазонов отличаются, что подтверждает приспособляемость алгоритма к различным исходным данным.

Приведенный алгоритм апробирован и опубликован [81]. Фрагменты программы ЭВМ, материалы аудиовизуальных отображений, а также свидетельство [81] приведены в приложении Е.

Найденные функции могут быть использованы для построения прибора, компенсирующего наводимые электромагнитные влияния, в части обоснованного получения порогов срабатывания.

4.3 Синтез устройства активной компенсации наводимых токов

4.3.1 Компенсатор.

Идея компенсирующего устройства основана на подавлении шумовых сигналов и не является абсолютно новой, например, в [22] показана адаптивная система компенсации шумовых помех в речи. Наипростейший вариант исполнения компенсатора проиллюстрирован на рисунке 4.7.

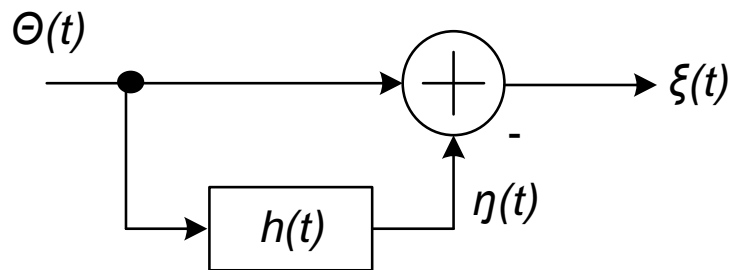


Рисунок 4.7 – Структурная схема системы активной компенсации

На рисунке 4.7 приняты следующие обозначения:

$\Theta(t)$ – сигнал наведенного воздействия;

$h(t)$ – импульсная функция корректирующего устройства;

$\eta(t)$ – компенсирующий ток;

$\xi(t)$ – погрешность компенсации.

Из рисунка 4.7 видно, что ядром устройства $h(t)$ является преобразователь измерительной информации $\Theta(t)$ в компенсирующий ток $\eta(t)$. В реальных системах нет возможности осуществить полную компенсацию наведенных влияний, ввиду чего останется некоторая погрешность $\xi(t)$. Целью синтеза компенсирующего устройства является нахождение такой импульсной функции $h(t)$, которая позволит, как минимум, снизить итоговую погрешность до приемлемых величин, а как максимум даст ее минимизацию.

4.3.2 Построение экспериментальной корреляционной функции.

Для осуществления идеи компенсации наведенных токов необходимо иметь корреляционную функцию [118]. Определить ее можно несколькими путями. Рассмотрим один из них.

Измерительная схема определения спектральной плотности наведенных токов приведена на рисунке 4.8 [63].

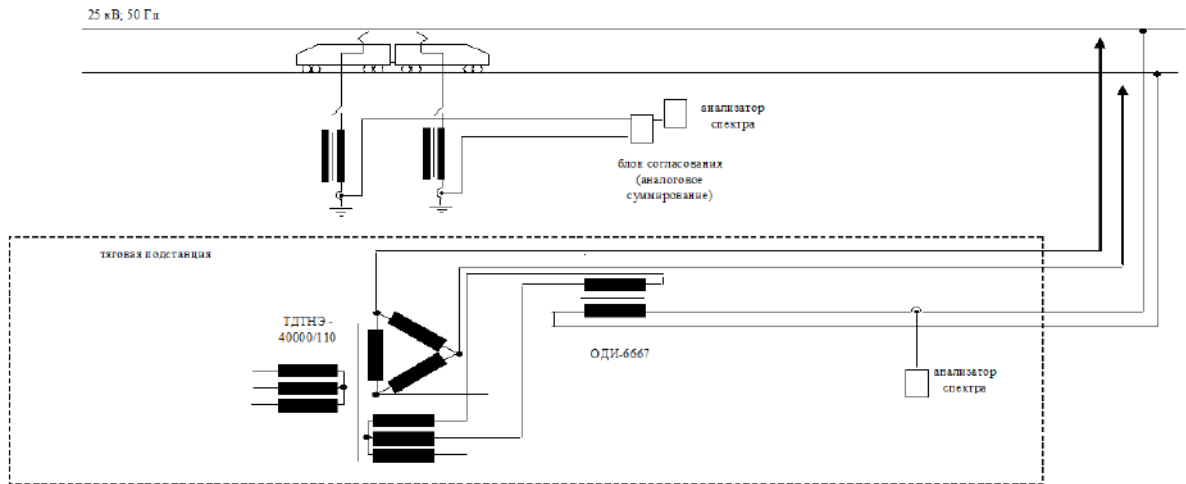


Рисунок 4.8 – Схема измерения спектральной плотности [63]

Результат измерений представлен на рисунке 4.9 (и в Приложении 1 [63]).

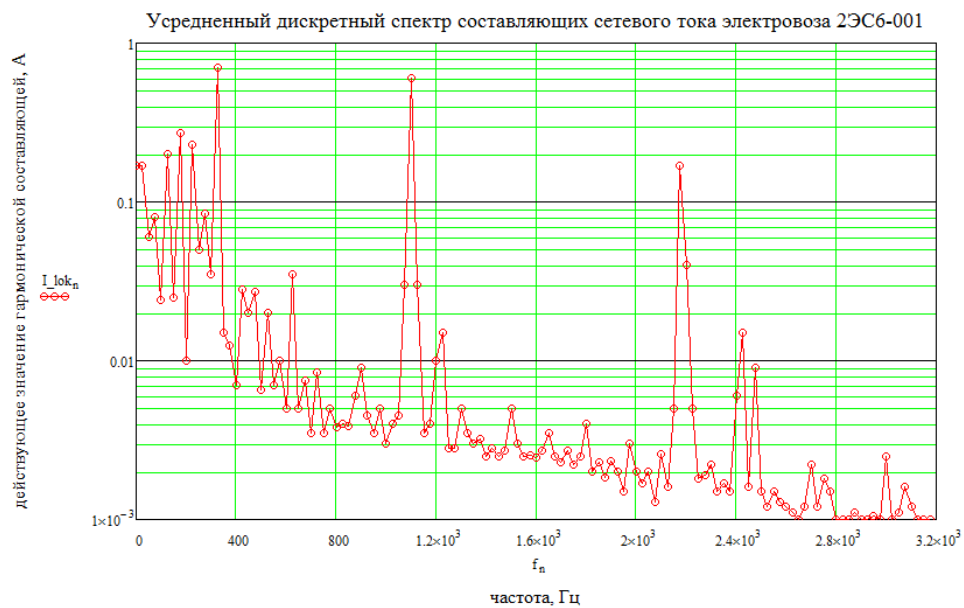


Рисунок 4.9 – Спектральная плотность наведенных токов [63]

Примем условие эргодичности случайных процессов [128], описывающих наведенные токи. В соответствии с этой концепцией для случайных стационарных процессов между корреляционной функцией и спектральной плотностью существует связь, определяемая парой преобразований Фурье (4.15, 4.16), строго установленная для случайных стационарных процессов А.Я. Хинчиным и Н. Винером [93]

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j\omega\tau} df, \quad (4.15)$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (4.16)$$

где $\omega = 2\pi f$;

$B(\tau)$ – корреляционная функция;

$G(f)$ – спектральная функция плотности.

Экспериментальная корреляционная функция, найденная путем быстрого преобразования Фурье, представлена на рисунке 4.10. Она не имеет аналитического описания, поэтому для дальнейшего исследования представим ее в виде ряда из нормализованных В-сплайнов [77, 126].

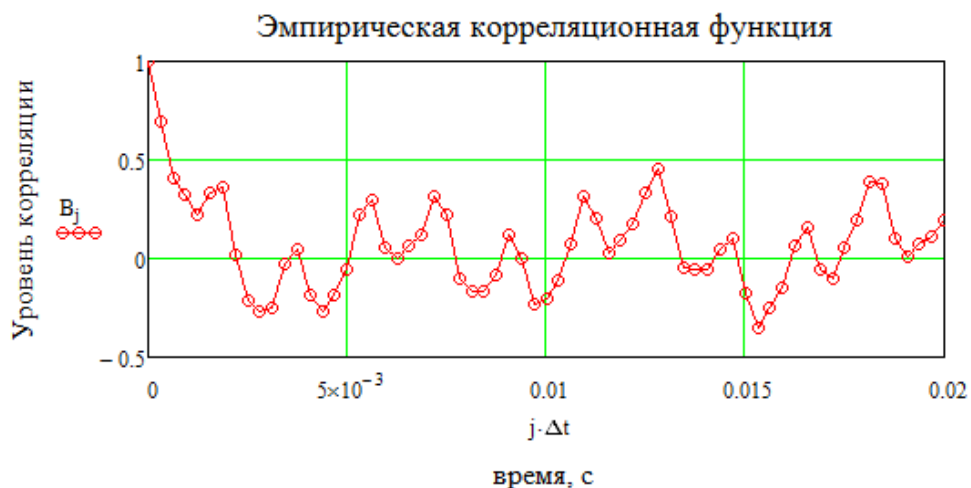


Рисунок 4.10 – Эмпирическая корреляционная функция

4.3.3 Аппроксимация экспериментальной функции корреляции.

В качестве критерия подобия удобно использовать минимум среднеквадратической ошибки ε корреляционной функции, в виде:

$$\varepsilon[\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_m] = \int_0^T \left(K_\xi(\tau) - \sum_{i=0}^m \Omega_i N_i(\tau) \right)^2 d\tau, \quad (4.17)$$

где $K_\xi(\tau)$ – эмпирическая функция корреляции;

Ω – вектор неизвестных параметров;

$N_i(\tau)$ – i -тый В-сплайн.

Ошибка ε является функцией от m переменных Ω , поэтому ее минимум находится в стационарной точке, определяемой системой уравнений:

$$\frac{\partial \varepsilon[\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_m]}{\partial \Omega_j} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, m. \quad (4.18)$$

Подставляя (4.17) в (4.18) получим уравнение:

$$\int_0^T 2 \left(K_\xi(\tau) - \sum_{i=0}^m \Omega_i N_i(\tau) \right) N_j(\tau) d\tau = 0, \quad (4.19)$$

преобразуя (4.19) придём к системе уравнений (4.20):

$$\sum_{i=0}^m \Omega_i \int_0^T N_i(\tau) N_j(\tau) d\tau = \int_0^T K_\xi(\tau) N_j(\tau) d\tau, \quad (4.20)$$

при $j = 0, 1, \dots, m$.

Для дальнейшего преобразования введем обозначения матрицы A и вектора B :

$$A_{i,j} = \int_0^T N_i(\tau) N_j(\tau) d\tau, \quad (4.21)$$

$$B_j = \int_0^T K_\xi(\tau) N_j(\tau) d\tau, \quad (4.22)$$

при $i, j = 0, 1, \dots, m$.

Окончательно система линейных уравнений приобретет канонический вид:

$$\sum_{i=0}^m \Omega_i A_{i,j} = B_j, \quad j = 0, 1, \dots, m. \quad (4.23)$$

Из (4.23) определяется вектор Ω :

$$\Omega = A^{-1}B. \quad (4.24)$$

Найденные коэффициенты функции аппроксимации В-сплайном дают минимум среднеквадратичного отклонения и могут быть использованы для генерации устройства компенсации наводимых токов.

4.3.4 Определение экспериментальной импульсной функции.

Для нахождения импульсной функции компенсатора (рисунок 4.7) определим дисперсию погрешности

$$M[\xi(t)^2] = M[(\Theta(t) - \eta(t))^2], \quad (4.25)$$

где $\Theta(t)$ – сигнал наведенного воздействия;

$\eta(t)$ – компенсирующий ток (противодействие);

$\xi(t)$ – погрешность компенсации.

Ток компенсирующего устройства $\eta(t)$ является результатом преобразования наведенного сигнала $\Theta(t)$ устройством компенсации, описываемого линейной системой

$$\eta(t) = \int_0^t h(t - \tau)\Theta(\tau)d\tau, \quad (4.26)$$

где $h(t - \tau)$ – импульсная функция корректирующего устройства.

Для исследуемой схемы корректора (рисунок 4.7) требуется определить такую импульсную функцию, чтобы минимизировать дисперсию погрешности компенсации (4.25). В развернутом виде погрешность имеет вид:

$$M[\xi(t)^2] = M[(\Theta(t)^2 - 2\Theta(t)\eta(t) + \eta(t)^2)]. \quad (4.27)$$

Первое слагаемое представляет собой дисперсию наведенного тока $M[\Theta(t)^2] = D_{\Theta}(t)$, второе – корреляцию:

$$M[\Theta(t)\eta(t)] = \int_0^t h(t - \tau)M[\Theta(t)\Theta(\tau)]d\tau. \quad (4.28)$$

Третье слагаемое равно [55]

$$M[\eta(t)^2] = \int_0^t \int_0^t h(t - \tau_1) h(t - \tau_2) M[\Theta(\tau_1)\Theta(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2. \quad (4.29)$$

Обозначив ковариационную функцию $M[\Theta(t)\Theta(\tau)] = K_\Theta(t, \tau)$, получим окончательное выражение погрешности:

$$\begin{aligned} M[\xi(t)^2] &= D_\Theta(t) - 2 \int_0^t K_\Theta(t, \tau) h(t - \tau) d\tau + \rightarrow \\ &\rightarrow + \int_0^t \int_0^t h(t - \tau_1) h(t - \tau_2) K_\Theta(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (4.30)$$

Для определения минимума (4.30) необходимо найти ее функциональную производную [36, 116]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\delta M[\xi(t)^2]}{\delta h(t - \tau)} \right|_{t - \tau = t_\varepsilon} &= -2K_\Theta(t, t - t_\varepsilon) + \rightarrow \\ &\rightarrow + \int_0^t h(t - \tau_1) K_\Theta(\tau_1, t - t_\varepsilon) d\tau_1 + \int_0^t h(t - \tau_2) K_\Theta(\tau_2, t - t_\varepsilon) d\tau_2. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Приравнявая (4.31) к нулю и с учетом эффективного времени корреляции T [93] после преобразования получим интегральное уравнение:

$$\int_{t-T}^t h(t - \tau) K_\Theta(\tau, t - t_\varepsilon) d\tau = K_\Theta(t, t - t_\varepsilon). \quad (4.32)$$

Решение (4.32), как и ранее, для корреляционной функции, будем искать в виде линейной оболочки В-сплайнов [77, 126]

$$h(\alpha) = \sum_{i=0}^I \Omega_i N_i(\alpha), \quad (4.33)$$

где I – количество В-сплайнов.

Определим носитель сплайнов $\Delta = \frac{T}{I}$.

Введем обозначения для матрицы a и вектора b :

$$a_{ij} = \int_{t-T}^t N_i(t - \tau) K_\Theta(\tau, t - j\Delta) d\tau, \quad i, j = 0, 1, \dots, I; \quad (4.34)$$

$$b_j = K_{\Theta}(t, t - j\Delta). \quad (4.35)$$

После преобразования (4.33) с учетом (4.34) и (4.35) получим линейное уравнение $a\Omega = b$, из которого определяются неизвестные коэффициенты

$$\Omega = a^{-1}b. \quad (4.36)$$

Результат решения для импульсной функции (4.33) представлен на рисунке 4.11 [101].

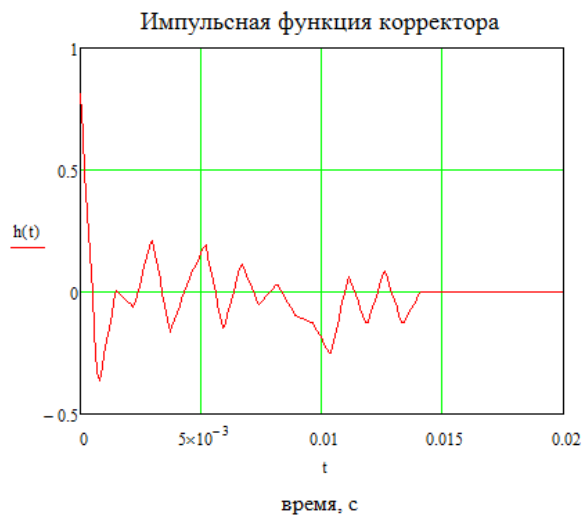


Рисунок 4.11 – Экспериментальная импульсная функция

Анализируя (4.32) видно, что это интегральное уравнение имеет следующее тривиальное решение: если представить импульсную функцию функцией Дирака, тогда, используя фильтрующее свойство, получаем тождество, которое свидетельствует о том, что спектральная плотность идеального решения не ограничена. Поэтому такое решение на практике осуществить невозможно. Однако, в приближенной реализации широкополосная импульсная функция имеет характер близкий к игольчатому, что как раз и показано на рисунке 4.11.

Зная импульсную и корреляционную функции и с учетом функций распределения и плотности распределения, а также основываясь на теоретических и экспериментальных исследованиях, можно сделать вывод о возможности построения и целесообразности применения активной системы компенсации наводок в тех случаях, когда стандартные, хорошо апробированные методы борьбы

с ними не приводят к ожидаемым результатам. Предложенное устройство целесообразно включать в такие моменты, когда интенсивность наводок превышает допустимый предел, с целью снизить средний уровень наводимых негативных влияний, что в результате позволит повысить общую защищенность кабельных направляющих систем и, как следствие, безопасность перевозочного процесса железных дорог России.

4.4 Синтез устройства активной компенсации линейных и квадратичных составляющих наводимых токов

4.4.1 Устройство компенсатора n -го порядка.

По аналогии с устройством активной компенсации наводимых токов, рассмотренным в пункте 4.3, возможен синтез устройств, выполняющих подавление составляющих и более высоких порядков [130]. Для этого необходимо и достаточно найти импульсные функции системы соответствующего порядка. С этой целью, по аналогии с (4.25) нужно определить среднеквадратическую погрешность компенсации, вида:

$$M[\xi(t)^2] = M[(\Theta(t) - \eta_{\Sigma}(t))^2], \quad (4.37)$$

где M – оператор математического ожидания;

$\xi(t)$ – погрешность компенсации;

$\Theta(t)$ – сигнал наведенного воздействия;

$\eta_{\Sigma}(t)$ – суммарный компенсирующий ток (противодействие), определяемое выражением:

$$\eta_{\Sigma}(t) = \eta_1(t) + \eta_2(t) + \dots + \eta_n(t), \quad (4.38)$$

где n – максимальный порядок компенсируемых составляющих.

В зависимости от веса $\eta_i(t)$ результирующую сумму можно ограничить несколькими первыми членами.

Так как при больших значениях n задача требует колоссальных аналитических и вычислительных мощностей, и в настоящий момент нереализуема, то с целью подтверждения масштабируемости и функциональности

методики, в дальнейшем исследовании ограничим n равным двум, и рассмотрим синтез устройства активной компенсации линейных и квадратичных составляющих наводимых токов.

4.4.2 Устройство компенсатора второго порядка.

Вариант системы активной компенсации, осуществляющей одновременное подавление линейных и квадратичных составляющих наводимых электромагнитных влияний, приведен на рисунке 4.12. Целью исследования такого устройства является дальнейшее повышение защищенности от наводимых влияний, которое может быть применено не только к существующим линиям телекоммуникаций и управления, но и в перспективных транспортных системах или даже в системах из смежных областей науки и техники.

В структуру устройства на рисунке 4.12 входят: детектор, наводимых на внешнюю оболочку, электромагнитных полей; интеллектуальные генераторы компенсирующих сигналов, линейной части – устройство компенсации первого порядка (УК 1) и нелинейной – УК 2; сумматор; генератор-преобразователь токов компенсации. Устройство должно выполнять статистическую обработку электромагнитной обстановки с целью интеллектуального регулирования значений $h_i(t)$, для чего можно использовать алгоритм, приведенный в разделе 4.2 и подтвержденный в [53, 81].

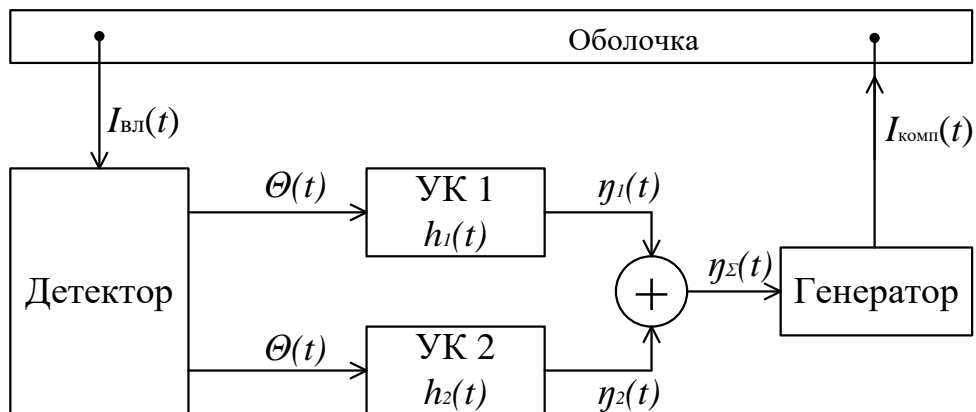


Рисунок 4.12 – Структурная схема системы активной компенсации с ядрами первого и второго порядка

Компенсирющие устройства первого $\eta_1(t)$ и второго $\eta_2(t)$ порядков описываются системами:

$$\eta_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t - \tau)\Theta(\tau)d\tau; \quad (4.39)$$

$$\eta_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(t - \tau_1, t - \tau_2)\Theta(\tau_1)\Theta(\tau_2)d\tau_1d\tau_2, \quad (4.40)$$

где $h_1(t - \tau)$ – импульсная функция первого порядка;

$h_2(t - \tau_1, t - \tau_2)$ – импульсная функция второго порядка.

Аналогично (4.39) и (4.40), при необходимости, определяются компенсирующие токи более высокого порядка.

С целью синтеза устройства ставится задача минимизировать среднеквадратическую погрешность (4.37), ограниченную первыми двумя составляющими, путем определения ядер линейной и квадратической составляющей компенсирующих устройств [101].

4.4.3 Метод решения.

Для определения импульсных функций из (4.39) и (4.40) раскроем функционал (4.39) с учетом (4.38), получаем:

$$M[\xi(t)^2] = M\left[(\Theta(t) - \eta_1(t) - \eta_2(t) - \dots - \eta_n(t))^2\right]. \quad (4.41)$$

Для рассматриваемой схемы ограничиваемся первыми двумя составляющими $\eta_1(t)$ и $\eta_2(t)$. Возведение в квадрат приводит к появлению следующих членов:

$$\begin{aligned} M[\xi(t)^2] = M[\Theta^2(t) - 2\Theta(t)\eta_1(t) - 2\Theta(t)\eta_2(t) + \\ + 2\eta_1(t)\eta_2(t) + \eta_1^2(t) + \eta_2^2(t)]. \end{aligned} \quad (4.42)$$

Дальнейшие вычисления производим поэлементно. Подставляя в (4.42) выражения (4.39) и (4.40) получаем систему функционалов:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\Phi_1 = K_\Theta(t, t); \\
\Phi_2[h_1] = -2 \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) K_\Theta(t, t - \tau) d\tau; \\
\Phi_3[h_2] = -2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) K_\Theta(t, t - \tau_1, t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2; \\
\Phi_4[h_1, h_2] = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) h_1(\tau) h_2(\tau_1, \tau_2) d\tau d\tau_1 d\tau_2. \quad (4.43) \\
\Phi_5[h_1] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_3, t - \tau_4) h_1(\tau_3) h_1(\tau_4) d\tau_3 d\tau_4; \\
\Phi_6[h_2] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_5, t - \tau_6, t - \tau_7, t - \tau_8) \times \rightarrow \\
\rightarrow \times h_2(\tau_5, \tau_6) h_2(\tau_7, \tau_8) d\tau_5 d\tau_6 d\tau_7 d\tau_8.
\end{array} \right.$$

Здесь корреляционные функции K_Θ определяются соотношением [61]:

$$K_\Theta(t_1, t_2, \dots, t_n) = M[\Theta(t_1), \Theta(t_2), \dots, \Theta(t_n)]. \quad (4.44)$$

Для поиска минимального значения среднеквадратической ошибки необходимо найти такие весовые функции h_1 , h_2 , которые доставляют экстремум функционалу (4.37). Как упоминалось ранее, такое значение достигается путем определения функциональных производных по соответствующим аргументам (функциям) и приравнивания их к нулю.

Здесь под функциональной производной понимается предел вида [28, 91]

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \max_{\tau} \delta h_1(\tau) \rightarrow 0}} \frac{\Phi[h_1 + \delta h_1] - \Phi[h_1]}{\int_t^{t+\Delta t} \delta h_1(\tau) d\tau} = \frac{\delta \Phi[h_1]}{\delta h_1}. \quad (4.45)$$

Конкретно к рассматриваемому примеру производные от (4.43) по h_1 получают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta\Phi_1}{\delta h_1} = 0; \\ \frac{\delta\Phi_2[h_1]}{\delta h_1} = -2K_\Theta(t, t - \tau); \\ \frac{\delta\Phi_3[h_2]}{\delta h_1} = 0; \\ \frac{\delta\Phi_4[h_1, h_2]}{\delta h_1} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) h_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2; \\ \frac{\delta\Phi_5[h_1]}{\delta h_1} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_3, t - \tau_4) h_1(\tau_3) d\tau_3; \\ \frac{\delta\Phi_6[h_2]}{\delta h_1} = 0. \end{array} \right. \quad (4.46)$$

Объединив результаты, получаем производную функционала (4.42) относительно ядра первого порядка. В соответствии с вышесказанным для нахождения экстремума полученное выражение необходимо приравнять к нулю. Окончательно получим уравнение:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_3, t - \tau_4) h_1(\tau_3) d\tau_3 + \\ & \rightarrow + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) h_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 = K_\Theta(t, t - \tau). \end{aligned} \quad (4.47)$$

Функциональные производные для ядра второго порядка определяются по аналогии с (4.45) путем пролонгации на двухмерное гильбертово пространство:

$$\lim_{\substack{\Delta T \rightarrow 0 \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ \max_{\tau_1, \tau_2} \delta h_2(\tau_1, \tau_2) \rightarrow 0}} \frac{\Phi[h_2 + \delta h_2] - \Phi[h_2]}{\int_T^{T+\Delta T} \int_t^{t+\Delta t} \delta h_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2} = \frac{\delta\Phi[h_2]}{\delta h_2}. \quad (4.48)$$

Применяя алгоритм (4.48) к функционалам (4.43) получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta\Phi_1}{\delta h_2} = 0; \\ \frac{\delta\Phi_2[h_1]}{\delta h_2} = 0; \\ \frac{\delta\Phi_3[h_2]}{\delta h_2} = -2K_\Theta(t, t - \tau_1, t - \tau_2); \\ \frac{\delta\Phi_4[h_1, h_2]}{\delta h_2} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) h_1(\tau) d\tau; \\ \frac{\delta\Phi_5[h_1]}{\delta h_2} = 0; \\ \frac{\delta\Phi_6[h_2]}{\delta h_2} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_5, t - \tau_6, t - \tau_7, t - \tau_8) h_2(\tau_5, \tau_6) d\tau_5 d\tau_6. \end{array} \right. \quad (4.49)$$

Произведя действия аналогичные как для нахождения уравнения линейной импульсной функции и объединив результаты получим систему интегральных алгебраических уравнений для определения ядер обоих устройств компенсаций. Данная система будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_3, t - \tau_4) h_1(\tau_3) d\tau_3 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) \times \rightarrow \\ \rightarrow \times h_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 = K_\Theta(t, t - \tau); \\ \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) h_1(\tau) d\tau + \rightarrow \\ \rightarrow + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_5, t - \tau_6, t - \tau_7, t - \tau_8) \times \rightarrow \\ \rightarrow \times h_2(\tau_5, \tau_6) d\tau_5 d\tau_6 = K_\Theta(t, t - \tau_1, t - \tau_2). \end{array} \right. \quad (4.50)$$

Анализ системы (4.50) показывает, что ядра устройств компенсации первого и второго порядка должны определяться совместно [130]. Полученные уравнения имеют структуру аналогичную (4.32), что явно указывает на возможность решения, а, следовательно, и на реализуемость всей системы активной компенсации.

Так же, в процессе функционирования, системе активной компенсации необходимо выполнять сбор и периодическую обработку статистической информации по токам для определения многопорядковых корреляционных

функций и последующей корректировке импульсных функций. Это позволит системе адаптироваться к изменяющимся условиям внешних электромагнитных влияний. Одновременно с этим, производимая корректировка функции распределения и плотности распределения, получаемых по предложенной в данной работе методике, будет обеспечивать оптимизацию моментов срабатывания системы компенсации.

4.5 Проверка реализуемости устройства активной компенсации наводимых токов

Система активной компенсации, приведенная на рисунке 4.7, подразумевает, что для успешной работы устройства компенсирующий ток максимально возможно приближен по своим параметрам к компенсируемому влиянию.

Как известно любой сигнал может быть представлен рядом гармонических функций. Соответственно параметрами, по которым необходимо выполнять приближение являются: амплитуда, частота и фаза.

Для подтверждения реализуемости устройства рассмотрим его работу на модельных примерах. В первом приближении будем полагать, что устройство активной компенсации выполняет свою работу исключительно на частоте основной гармоники питающей сети. Данное допущение легко пролонгируется на остальные спектральные составляющие и не требует дополнительных моделей для подтверждения.

4.5.1 Проверка по амплитудной составляющей.

В данной модели начальное условие по совпадению частоты дополняется условием совпадения фаз сигналов.

Работа устройства может быть проиллюстрирована на примере модели, представленной на рисунке 4.13. Данная модель выполнена с применением программного пакета Simulink и имеет четыре основных блока.

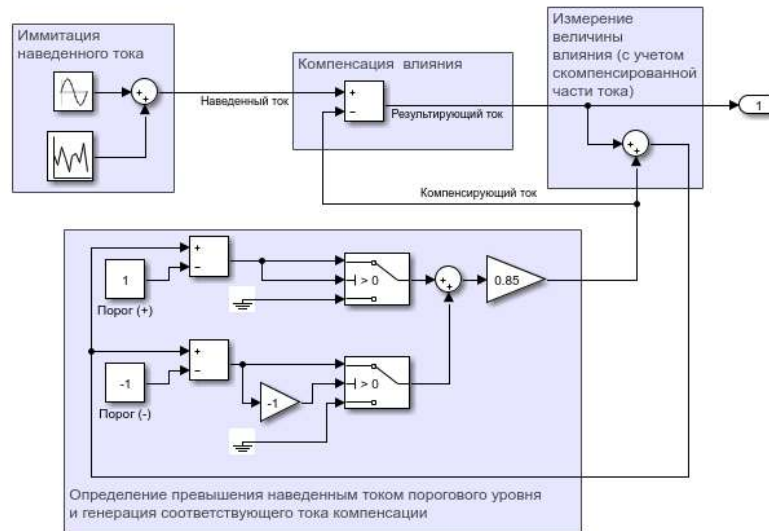


Рисунок 4.13 – Модель функционирования системы активной компенсации
наводимых токов

Блок иммитации наведенного тока генерирует зашумленный сигнал на частоте основной гармоники тягового электроснабжения.

В блоке компенсации влияния производится сложение наведенного и компенсирующего тока, взятого с в противофазе к наведенному.

Третий блок выполняет измерение результирующего тока. В реальной системе измеряемый ток будет включать в себя и скомпенсированную составляющую, в связи с тем, что измерение и влияние осуществляется на один и тот же кабель. При этом система активной компенсации, подключенная к кабелю, схематично может быть представлена в виде устройства на рисунке 4.14.

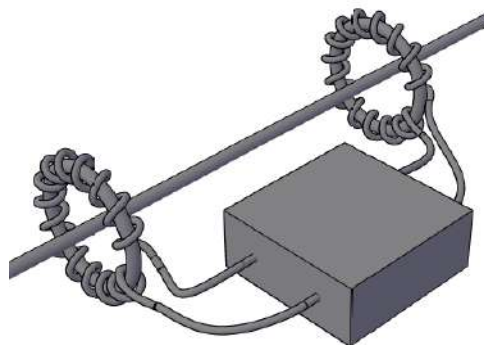


Рисунок 4.14 – Вариант исполнения системы активной компенсации наводимых
токов

В соответствии с этим, в третьем блоке модели на рисунке 4.13, для устранения проблем с биениями, выполняется нивелирование компенсирующего воздействия в измеренном токе и выделение наведенной составляющей.

Последний блок выполняет определение факта превышения наведенным током установленного порогового значения и генерирует ток компенсации. Так как наведенный сигнал может превышать порог как в положительную, так и отрицательную сторону, то данный блок выполняет независимый анализ этих условий и подает сигнал на включение генератора только при срабатывании одного из датчиков превышения. Для упрощения в данном модельном примере генератор тока компенсации заменен системой, пропускающей 85% от величины наведенного тока.

Результат работы данной модели представлен на рисунке 4.15. Пунктирной линией обозначен наведенный ток, а сплошной – результирующий.

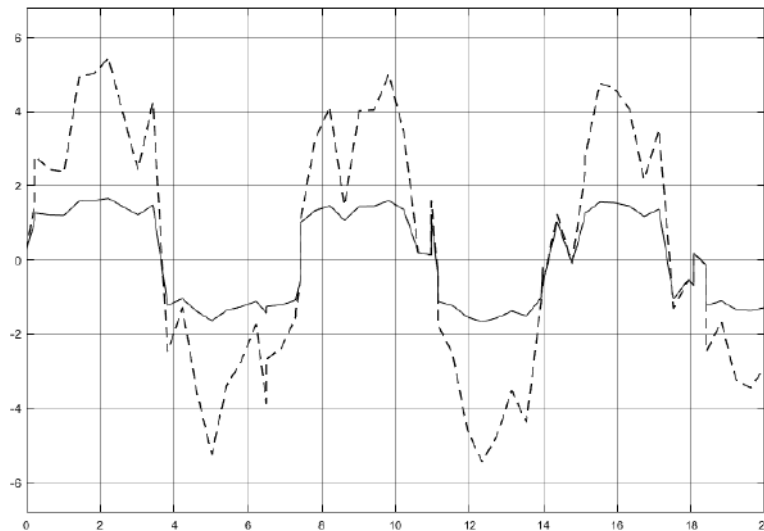


Рисунок 4.15 – Результат моделирования процесса компенсации

Как видно по рисунку 4.15, при превышении наведенным током пороговых значений «1» и «-1» соответственно происходит активация системы компенсации. Точность компенсации будет зависеть от системы генерации компенсирующего тока. В результате работы системы наведенное влияние снижается до допустимых величин, что обеспечит соответствующее повышение безопасности.

Таким образом данная модель подтверждает возможность осуществления компенсации при выполнении условий совпадения частоты и фазы сигналов.

4.5.2 Проверка по фазовой составляющей.

В данной модели начальное условие по совпадению частоты дополняется условием совпадения амплитуд сигналов и рассматривается влияние величины разницы фаз на результат компенсации.

Моделирование выполнено с применением системы Comsol. Общий вид модели приведен на рисунке 4.16. Данная модель включает: трубчатый проводник, представляющий оболочку кабеля, а также два элемента, реализующих электромагнитное наведение токов на оболочку. При этом один элемент имитирует внешнее воздействие на кабель и имеет следующие постоянные параметры тока в нем: амплитуда 1 А; фаза 0° ; частота 50 Гц.

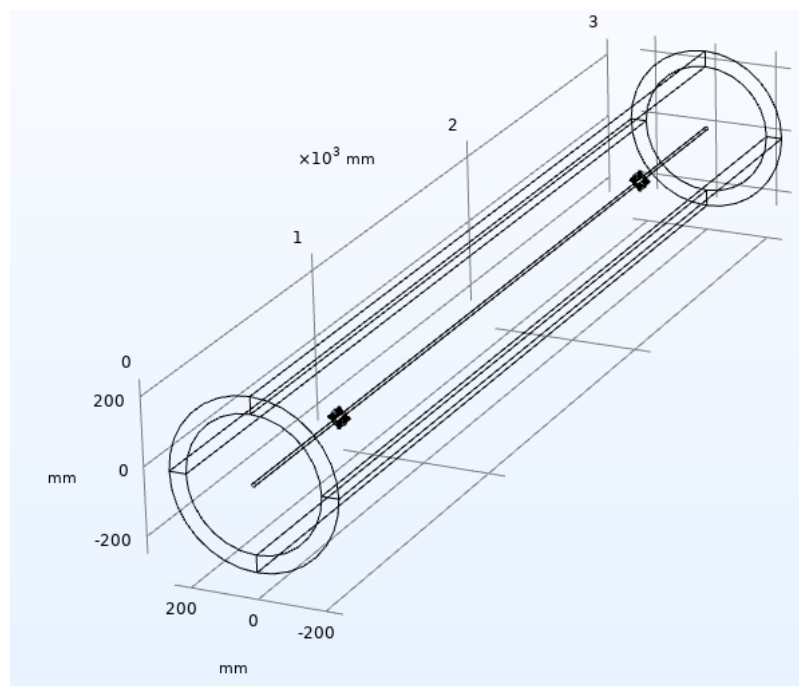


Рисунок 4.16 – Модель для проверки зависимости процесса компенсации от фазовой составляющей

Второй элемент реализует компенсирующее воздействие от системы компенсации. Параметры тока во втором элементе имеют постоянные значения амплитуды и частоты, совпадающие по величине с аналогичными во влияющем

устройстве. Величина фазы в свою очередь изменяется в диапазоне от -45° до 45° . Оба элемента установлены встречно, таким образом компенсация должна достигать максимальной величины при достижении фазы тока в компенсирующем элементе значения равного 0° .

Конструктивно данные элементы в модели представляют из себя четыре закольцованных медных проводника, одетых на тороидальный сердечник, размещенный вокруг оболочки кабеля таким образом, как это изображено на рисунке 4.17.

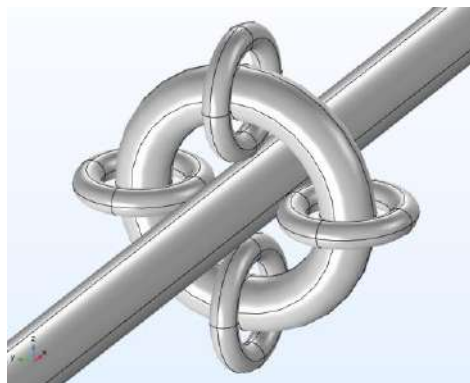


Рисунок 4.17 – Модель влияющего элемента

Программно токи в закольцованных проводниках равны между собой. Это позволяет создать электромагнитное поле, вызывающее ток, протекающий вдоль оболочки кабеля.

Все рассмотренные элементы на рисунке 4.16 помещены в область пространства, дающую возможность расчета электромагнитных полей и влияний.

Результаты моделирования приведены на рисунке 4.18.

Как видно по рисунку 4.18, при выполнении условий совпадения частоты и амплитуды сигналов эффективность компенсации будет зависеть от точности подстройки фазы системы генерации компенсирующего тока.

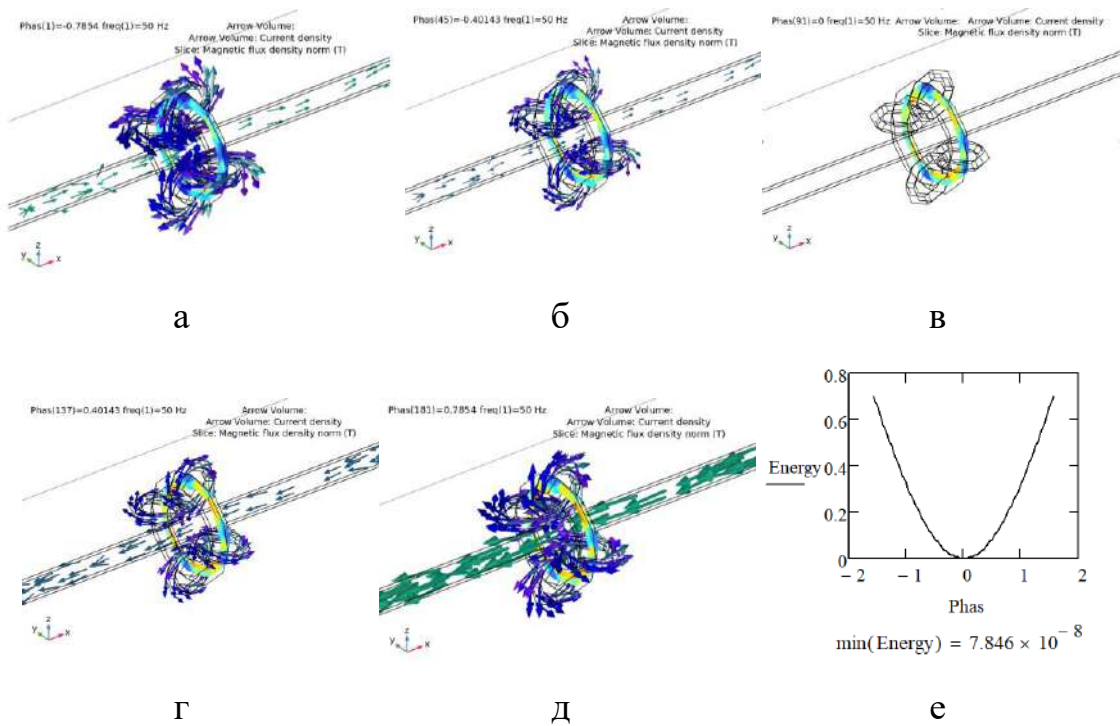


Рисунок 4.18 – Результат моделирования зависимости компенсации от фазы: а) фаза -45° ; б) фаза -23° ; в) фаза 0° ; г) фаза 23° ; д) фаза 45° ; е) зависимость энергии протекающего по оболочке тока от фазы тока в компенсирующем элементе

Также можно сделать вывод, что произведенное моделирование подтверждает возможность осуществления компенсации, эффективность которого будет зависеть от точности подстройки параметров компенсирующего тока, в частности амплитуды, частоты и фазы.

4.6 Алгоритм работы комплексной системы защиты

На основании проведенных диссертационных исследований и полученных результатов, в частности системы активной компенсации и системы самоорганизующихся генераторов, предлагается комплексный подход к повышению надежности компонентов и эффективности функционирования электротехнических комплексов. Такая комплексная система защиты гармонично сочетает в себе хорошо известные существующие пассивные устройства защиты смежных систем управления и телекоммуникаций, дополненные, разработанной в

ходе исследований, системой активной компенсации при поддержке системы самоорганизующихся генераторов.

Алгоритм работы комплексной системы защиты состоит из трех этапов.

На первом этапе при слабых уровнях внешних электромагнитных воздействий обеспечение безопасности выполняется существующими системами защиты. При этом система активной компенсации осуществляет лишь мониторинг текущих значений наводимых токов и в случае их возрастания свыше допустимого порога инициирует переход ко второму этапу.

На втором этапе при повышенных уровнях внешних электромагнитных воздействий подключается система активной защиты, которая снижает уровень наводимых влияний до допустимых значений, что не только уменьшает вероятности аварий, но и повышает надежность работы систем синхронизации. Компенсация производится до тех пор, пока уровни наводимых влияний вновь не снизятся до приемлемых величин. Алгоритм работы системы активной компенсации наводимых токов приведен на рисунке 4.19.

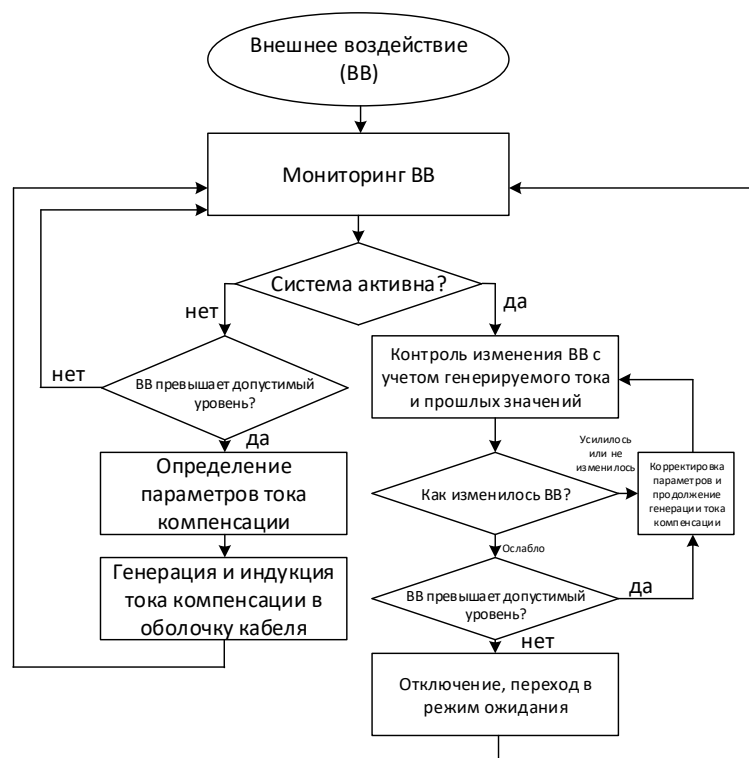


Рисунок 4.19 – Алгоритм работы системы активной компенсации наводимых ТОКОВ

Однако, даже при наличии и правильном функционировании пассивных и активных систем защиты остается ненулевая вероятность появления сбоев в системе синхронизации. На предотвращение деструктивных последствий от подобных сбоев и направлен третий этап работы комплексной системы защиты.

Таким образом на третьем этапе, в случае произошедшего сбоя системы синхронизации, осуществляется поддержание внутренней частоты системой самоорганизующихся генераторов. Что в свою очередь повышает синхростабильность телекоммуникационных систем и повышает скорость вхождения в синхронный режим при восстановлении связи.

4.7 Выводы по главе

1. В результате статистической обработки была предложена методика оценки функции и плотности распределения, которая позволяет производить одновременную аппроксимацию функций распределения и, соответствующих им, плотностей распределений с учетом минимизации внешнего регуляризирующего воздействия, что отличает данную методику от аналогичных работ, представленных в [68, 72]. Получаемые оценки распределений лишены недостатков гистограммного метода, а применение критерия минимума функционала невязки позволяет минимизировать ошибки аппроксимации. Применение метода непараметрического исчисления в целом позволило максимально снизить расхождение результата расчетов с экспериментальными данными. Точность приближения зависит от выбранного количества точек приближения n . Чем больше n , тем выше точность, но сложнее вычисления. Найденные функции могут быть использованы для построения прибора, компенсирующего наводимые электромагнитные влияния, в части обоснованного получения порогов срабатывания.

2. Произведенный синтез устройства активной компенсации наводимых токов показал возможность построения активной системы компенсации наводок, на основе измеряемых статистических данных и определяемых из них импульсной

и корреляционной функции и с учетом функции и плотности распределения, получаемых по предложенной методике.

3. Выполненный синтез устройства активной компенсации линейных и квадратичных составляющих наводимых токов показал реализуемость системы активной компенсации, ее масштабируемость вплоть до составляющих n -го порядка, а также высокую степень адаптируемости к изменяющимся условиям внешних электромагнитных помех.

4. Предложенный в п. 4.6 алгоритм работы демонстрирует законченность диссертационных исследований и позволяет объединить полученные научные результаты в единое решение – комплексную систему защиты, которая может быть применена как на существующих, так и на вновь вводимых в эксплуатацию железнодорожных участках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выполнено математическое моделирование электромагнитного воздействия тяговых сетей на кабельную линию управления в рамках строгой постановки задачи электромагнитного анализа на основе уравнений Максвелла с учетом различных сред и граничных условий и произведена оценка индуктируемых токов в оболочке кабельной линии.

2 Проведен эксперимент по оценке уровня индуктируемых в оболочке кабельной линии токов, вызванных электромагнитными полями тяговых сетей, электроподвижным составом и другими элементами транспортного электротехнического комплекса. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими оценками, полученными на основе математической модели.

3 Выявлено влияние индуктируемых токов в кабельной линии на цифровые каналы управления электротехнических комплексов, приводящее к увеличению вероятности ошибок за счет сбоев системы синхронизации.

4 Предложено для уменьшения вероятности ошибок использовать меры по устойчивой синхронизации цифровых каналов. Рекомендуется использовать эффект использования взаимосвязанных генераторов, заключающийся в явлении их самоорганизации. В частности, экспериментально получено снижение нестабильности генерации частоты с 11% для одного генератора до 7% у двух и до 3% у трех взаимосинхронизированных генераторов.

5 Разработан математический аппарат статистического анализа электромагнитных воздействий и предложен алгоритм согласованной оценки плотности и функции распределения. Разработанная программа реализации алгоритма оценки подтверждена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ.

6 Выполнен синтез устройств, направленных на повышение безопасности и работоспособности компонентов электротехнического комплекса. На основе данных устройств, алгоритма оценки и кластера самоорганизующихся генераторов

предложена комплексная система снижения индуктированных токов путем использования противотоков.

7 Рекомендуется применение предложенной комплексной системы защиты на вновь проектируемых и при модернизации существующих железнодорожных участков, что позволит повысить работоспособность компонентов системы управления транспортным электротехническим комплексом.

8 Перспективой дальнейшей разработки является создание, на основе разработанных в диссертационном исследовании принципов, системы защиты пассажиров и грузов от электромагнитного воздействия для высокоскоростного транспорта будущего. Полномасштабный расчет структуры такой системы защиты может быть выполнен на основе технологий больших данных и использования многоядерных вычислителей, распределенных вычислительных сетей, облачных вычислений, квантовых компьютеров и т.д. Применение предлагаемых методов вычислений и технологий позволит произвести многофакторное математическое моделирование на основе которого могут быть разработаны более совершенные способы повышения надежности и эффективности использования подвижного состава и сопутствующих средств обеспечения движения поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арнольд, В.И.** Математические методы классической механики : учеб. пособие для вузов / В.И. Арнольд. – М. : Наука, 1989. – 472 с.
2. **Атаев, Д.И.** Аналоговые интегральные микросхемы для бытовой радиоаппаратуры. Справочник. / Д.И. Атаев, В.А. Болотников – М. : Изд-во МЭИ, 1991. – 240 с.
3. **Бадёр, М. П.** Анализ и синтез электромагнитной совместимости / М. П. Бадёр // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 6. – С. 34–40.
4. **Бакин, М. Е.** Анализ электромагнитной совместимости рельсовой цепи тональной частоты с автоматическим регулированием уровня сигнала с электропоездом «Сапсан» / М. Е. Бакин // Труды тринадцатой научно-практической конференции "Безопасность движения поездов" – М.: МИИТ, 2012. – С. 74–77.
5. **Бакин, М. Е.** Методика расчёта растекания переменных составляющих тягового тока в рельсовых линиях / М. Е. Бакин // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов каф. «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС; под. ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – С. 55–59.
6. **Бакин, М.Е.** Электромагнитная совместимость тональной рельсовой цепи с автоматическим регулированием уровня сигнала и тягового подвижного состава / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, М. – 2016. – 191 с.
7. **Беляков, И. В.** Контроль состояний рельсовой линии методом совместного обнаружения и оценивания / И. В. Беляков // Транспорт Урала. – 2009. – № 3. – С. 48–49.
8. **Борисов, П. А.** Повышение эффективности функционирования электротехнических устройств контроля технического состояния кабельных линий при их трассировке / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Тула – 2015. – 101 с.

9. **Брылеев, А. М.** Теория, устройство и работа РЦ / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
10. **Бургсдорф, В.В.** Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
11. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля / под ред. С.М. Рытова // М.: «Наука», 1978 – 463 с.
12. Влияние параметров грунта на эффективность контура заземлителя молниезащиты / Н.Ф. Калюжный, Г.Ф. Сичинава, В.Н. Таран, А.В. Шандыбин // Транспорт: наука, образование, производство. Ростов-на-Дону, 2022. С. 100-104.
13. **Вулих, Б.З.** Краткий курс теории функций вещественной переменной. Введение в теорию интеграла / Б.З. Вулих // М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973 г. – 352 с.
14. **Говорков, В.А.** Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах / В.А. Говорков, С.Д. Купалян – М.: Высшая школа, 1963 – 371 с.
15. **Говорков, В.А.** Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков – М.: Связьиздат, 1951 – 341 с.
16. **Голубев, А.С.** Оценка показателей технологической эффективности и надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Пенза – 2016. – 135 с.
17. **Горенбейн, Е. В.** Распределение гармонических составляющих тягового тока в рельсовой линии / Е. В. Горенбейн; под общ. ред. С. С. Чернова // Наука и современность – 2010 : сборник материалов V Международной научно-практической конференции : в 3-х частях. Часть 2. – Новосибирск : Издательство НГТУ, 2010. – С. 183–188.
18. **ГОСТ Р 55176.3.1-2012.** Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Подвижной состав. Требования и методы испытаний. – Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 47 с.
19. **ГОСТ Р 55176.3.2-2012.** Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть

3-2. Подвижной состав. Аппаратура и оборудование. Требования и методы испытаний. – Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартиформ, 2014. – 50 с.

20. **ГОСТ Р 55176.4.1-2012.** Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 4-1. Устройства и аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Требования и методы испытаний. – Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартиформ, 2014. – 48 с.

21. **ГОСТ Р 58321-2018** Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Дата введения 01.07.2019. Дата актуализации 01.01.2021.

22. **Гудкова, Н.В.** Прецизионное устройство подавления периодических помех в речевых сигналах / Н.В. Гудкова, Е.А. Жебрун // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014 – № 05 – С. 66 – 71.

23. **Делянов, А.Г.** Расчет поля в многослойной земле методом оптической аналогии / А.Г. Делянов, А.Б. Ослон // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1984. № 2. С. 146–153.

24. **Джунусова, Д.Т.** Вопросы синхронизации в мультисервисных сетях / Д.Т. Джунусова, Р. Насыров, А. Ти // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика. – 2018. – С. 125-129.

25. **Дмитриев, М.В.** Транспозиция экранов кабелей 6-500 кВ. Практические аспекты использования / М.В. Дмитриев, М.Р. Кияткина // Новости электротехники. 2012. №2(74). С. 80-84.

26. **Дмитриев, М.В.** Эффективность применения металлической шины, параллельной однофазным кабелям / М.В. Дмитриев, М.Р. Кияткина // Энергетик. 2012. №6. С. 20-22.

27. **Долгий, И. Д.** Методы, модели и алгоритмы обеспечения безопасности движения поездов в системе ДЦ-ЮГ с РКП / И. Д. Долгий // М.: Информатизация и связь. – 2011. – № 3. – 2011.Б.

28. **Дубровин, Б.А.** Современная геометрия: Методы и приложения / Б.А. Дубровин, С.П. Новиков, А.Т. Фоменко // М.: Наука, 1979 – 760 с.

29. **Емельянов, И.Г.** Определение напряженного состояния тонкостенных конструкций с использованием методов теории оболочек / И.Г. Емельянов, А.В. Кузнецов // Сетевой Электронный Журнал "Транспортные системы и технологии". - 2017. - Т. 3. - №3. - С. 64-78. doi: 10.17816/transsyst20173364-78

30. **Ефанов, Д. В.** Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1 (44). – С. 35–40.

31. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение): справочник / Р.К. Борисов и др. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.

32. **Иванов, А.А.** Анализ влияния случайных шумов на синхронизацию в системе двух связанных осцилляторов Дуффинга / А. А. Иванов // Сиб. журн. индустр. матем., 22:1. – 2019. – С. 41–52.

33. **Иванов, Д. А.** Повышение эффективности функционирования концевых муфт кабельных линий и электротехнических устройств контроля их технического состояния трассировке / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Тула – 2014. – 100 с.

34. **Казаков, В.А.** Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. / В.А. Казаков. – М. Сов. радио, 1973 г. – 232 с.

35. **Калимов, А.Г.** Развитие численных методов расчета электромагнитных полей, основанных на применении пространственных интегральных уравнений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Санкт-Петербург, ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», 2014. – 33 с.

36. **Канторович, Л.В.** Функциональный анализ / Л.В. Канторович, Г.П. Акилов – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 752 с.

37. **Канторович, Л.В.** Функциональный анализ, изд. второе / Л.В. Канторович, Г.П. Акилов – М.: Наука, 1977. – 744 с.

38. **Кирпач, Е.Н.** Математическое моделирование процессов самоорганизации в широкополосных системах // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Ростов-на-Дону, РГУПС, 2010. – 122 с.

39. **Кирпач, Е.Н.** Моделирование самоорганизующейся системы фазовой автоподстройки / Е.Н. Кирпач, В.Н. Таран // Математическое моделирование. — 2010. Том 22. - №2. - С. 105-112.

40. **Кирпач, Е.Н.** Самоорганизация порционных распределений в процессе синхронизации сверхширокополосных сигналов. / Е.Н. Кирпач, В.Н. Таран // Труды всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2009», Ростов-на-Дону, РГУПС, 2009. С. 88-90.

41. **Кирпач, Е.Н.** Синхронизация широкополосных сигналов на основе уравнения Стратоновича. / Е.Н. Кирпач, В.Н. Таран // Вестник РГУПС. — 2008. №4. — С. 72-77.

42. **Колечицкий, Е.С.** Основы расчета заземляющих устройств: учебное пособие / Е.С. Колечицкий. – М.: Изд. МЭИ, 2001. – 48 с.

43. **Колмогоров, А.Н.** Элементы теории функций и функционального анализа. / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. – 543 с.

44. **Копырюлин, П. В.** Совершенствование эксплуатационных свойств кабельных линий с полимерной изоляцией / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Самара – 2013. – 125 с.

45. **Копырюлин, П.В.** О проблемах обеспечения электромагнитной совместимости при передаче перенапряжений в электроустановках 0,4 ÷ 35 кв. / П.В. Копырюлин, В.Г. Гольдштейн, О.М. Севостьянова // Вестник СамГТУ. – 2013. – №1 – С. 180-191.

46. **Коржов, А. В.** Комплексный анализ состояния и повышения эксплуатационной надёжности кабельных линий 6(10) кВ с бумажной пропитанной изоляцией в условиях городских электрических сетей / Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук, Челябинск – 2016. – 365 с.

47. **Коржов, А.В.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / А.В. Коржов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 70 с.

48. **Коровкин, Н.В.** Расчетные методы в теории заземления. Научно-технические ведомости СПбГПУ / Н.В. Коровкин, С.Л. Шишигин // Изд-во СПбГПУ. Вып.1(166). – 2013. – С.74-79.

49. **Кравцов, Ю. А.** Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и РЦ 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.

50. **Крамер, Г.** Математические методы статистики : [пер. с англ] / Г. Крамер – 2-е изд., стер. – М. : Мир, 1975. – 648 с.

51. **Кремер, Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов / Н.Ш. Кремер – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

52. **Кульбикаян, Х.Ш.** Модель взаимодействия тяговой сети и линии связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 7. – С. 10–12;

53. **Кульбикаян, Х.Ш.** Оценка плотности вероятности наведенных токов в оболочках кабельных сетей связи / Х.Ш. Кульбикаян, В.Н. Таран, А.В. Шандыбин, Б.Х. Кульбикаян / Вестник РГУПС, № 4 (60), 2015 г. – С. 41 – 48.

54. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика, Том II: Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц – М.: Наука, 1973. – 504 с.

55. **Левин, Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Книга вторая. / Б.Р. Левин – М.: Изд-во «Советское радио», 1968 г. – 504 с.

56. **Лисенков, В. М.** Анализ и синтез рельсовых линий / В. М. Лисенков, А. Е. Ваньшин // Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. – № 4 (28). – С. 4–9.

57. **Лонкина, Д.В.** Электродинамический анализ и синтез частотно-селективных устройств на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями и кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Ростов-на-Дону, ФГАОУ ВО ЮФУ, 2022. – 173 с.

58. **Лопатин, В.Ф.** Экспериментальное исследование работы генераторов гармонических колебаний при их взаимной синхронизации / В. Ф. Лопатин, В. Н.

Таран, А. В. Шандыбин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4 (56). С. 70-75.

59. Луценко, С.А. Подход к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе цикловой синхронизации спутниковых линий связи / С.А. Луценко // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. – 14 с. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/14/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.14 .

60. Лхамсурэн, Энхсүх Совершенствование технологии поиска замыкания на землю воздушных линий 10кВ в сети с изолированной нейтралью / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва - 2017. – 184 с.

61. Мандель, Л. Оптическая когерентность и квантовая оптика / Л. Мандель, Э. Вольф. Под ред. В.В. Самарцева. // Пер. с англ. – М.: Наука., 2000. – 896 с.

62. Миронов, М.А. Полиmodalность апостериорного распределения в задачах оптимальной нелинейной фильтрации / М.А. Миронов // РЭ. — 1982. Том XXVII.-№7. -С. 1342-1343.

63. Назаров, О.Н. «Параметры тока электроподвижного состава постоянного и переменного тока, оказывающие мешающее влияние на линии связи». / О.Н. Назаров, Н.Б. Никифорова, А.П. Петровичев. Информационный отчет (к договору №3338/08/1501 между ОАО ВНИИЖТ и ВНИИАС МПС России). – М.: ОАО ВНИИЖТ, 2008 год. – 43 с.

64. Нгуен Ты Определение электромагнитных влияний высоковольтных и многоамперных ЛЭП на смежные линии // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Иркутск, ФГБОУ ВО ИНИТУ, 2021. – 188 с.

65. Нгуен Ты Взаимные электромагнитные влияния в тяговых сетях с экранирующими и усиливающими проводами // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2018. – Т. 1. – С. 163-164.

66. Нормы безопасности на железнодорожном транспорте: НБ ЖТ ЦТ 04-98. Электровозы. Требования по сертификации. Введ. 07.08.98., – М.: 2003. – 172 с.

67. О сведении уравнений Максвелла в волноводах к системе связанных уравнений Гельмгольца / М.Д. Малых и др. // *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*. – 2018. – Т. 26. – №. 1. – С. 39-48.

68. Оптимальная оценка сигналов в адаптивных оптических системах передачи информации / Д.А. Безуглов, И.В. Решетникова, В.И. Юхнов, А.А. Ячменов. // *Вестник РГУПС*. – 2014. – № 1. – С 30 – 35.

69. **Параев, Ю.И.** Введение в статистическую динамику процессов управления и фильтрации / Ю.И. Параев. – М. Сов. радио, 1976 г. – 184 с.

70. Патент на изобретение № RU 2411592 С2 «Система активного шумоподавления и ее применение» Брайтбах Харальд (DE), Гернер Кристиан (DE), Захау Дельф (DE), Зоммер Йохен (DE). Заявка: 2007139146/28 от 05.04.2006.

71. **Пиковский, А.** Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление / А. Пиковский, М. Розенблум, Ю. Куртс. – М. : Техносфера, 2003. – 496 с.

72. **Поршнева, С.В.** Использование аппроксимации Розенблатта – Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения / С.В. Поршнева, А.С. Копосов // *Научный журнал КубГАУ*. – 2013. – № 92 (08). – С. 1-27.

73. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока : Утв. М-вом связи СССР и М-вом путей сообщ. СССР в окт. 1987 г. - М.: Транспорт, 1989. - 134 с

74. Приказ Минтранса РФ от 6 августа 2008 г. N 126 "Об утверждении Норм отвода земельных участков, необходимых для формирования полосы отвода железных дорог, а также норм расчета охранных зон железных дорог" [Электронный ресурс] / Система ГАРАНТ // Точка доступа: <http://base.garant.ru/12162226/>. Дата обращения: 05.04.2020 г.

75. **Рабани, Жан М.** Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования / Жан М. Рабани, Ананта Чандракасан, Боривож Николич. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2007. – 912 с.

76. Разработка методики расчета опасных и мешающих влияний электротяги постоянного и переменного тока на аппаратуру проводной связи / Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян, Л.А. Зайцева, А.В. Шандыбин // Отчет о научно-исследовательской работе (Договор с ВНИИАС №86/1501 от 01.02.08 г.) – РГУПС, 2009 г. – 132 с.

77. **Роджерс, Д.** Математические основы машинной графики: Пер. с англ./ Д. Роджерс, Дж. Адамс – М. Мир, 2001. – 604 с.

78. **Розенберг, Е. Н.** Реализация стратегии обеспечения безопасности перевозочного процесса / Е. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 1. – С. 6–9.

79. **Савченко, А.О.** Проводящее тело в переменном магнитном поле / А.О. Савченко, О.Я. Савченко // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 7. – С. 8-12.

80. **Сапожников, В. В.** Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов; под общ. ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.

81. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660049.** Программа для реализации алгоритма оценки плотности вероятности и функции распределения по критерию минимума функционала качества / А.В. Шандыбин, В.Н. Таран, Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян. – Заявка № 2015614490 ; заявл. 29.05.2015 ; гос. Регистрация в реестре программ для ЭВМ 21.09.2015.

82. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009614502.** Программа моделирования самоорганизации в системе фазовой синхронизации. / Е.Н. Кирпач, В.Н. Таран. – 2009.

83. **Сильвестер, П.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: Пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари – М.: Мир, 1986. – 229 с.

84. **Скляр, Бернард** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. / Бернард Скляр – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

85. **Соколов, С.В.** Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем / С.В. Соколов, В.А. Погорелов. — М.: Физматлит, 2009. — 184 с.

86. **Сосулин, Ю.Г.** Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. Пособие для вузов / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.

87. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс] / (Утв. Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р) // Точка доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=155#6208>. Дата обращения: 31.08.2023 г.

88. **Стратонович, Р.Л.** Условные Марковские процессы и их применение к теории оптимального управления / Р.Л. Стратонович. – М.: МГУ, 1965. - 319 с.

89. **Таран, В.Н.** Анализ распределения электростатического поля вблизи одиночного молниеотвода методом конечных элементов / В.Н. Таран, А.В. Шандыбин, Х.Ш. Кульбикаян // Цифровые инфокоммуникационные технологии. сборник научных трудов. Ростов-на-Дону, 2021. – С. 145-148.

90. **Таран, В.Н.** Точность численных методов анализа электростатических полей / В.Н. Таран, М.В. Шевлюгин, А.В. Шандыбин // Сетевой Электронный Журнал "Транспортные системы и технологии". - 2021. - Т. 7. - №1. - С. 59-70. doi:10.17816/transsyst20217159-70.

91. **Таран, В.Н.** Функциональное уравнение длинной линии / В.Н. Таран / Радиотехника и электроника, Т. 36, 1991 г. – С. 1497.

92. **Татарский, В.И.** Распространение волн в турбулентной атмосфере / В.И. Татарский. – М.: Наука, 1967. – 548 с.

93. Теория электрической связи: Учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров. Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1999 – 432 с.

94. **Тихонов, А.Н.** Методы решения некорректных задач. / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – 2-е изд. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 285 с.
95. **Тихонов, В.И.** Марковские процессы. / В.И. Тихонов, М.А. Миронов – М., «Сов. радио», 1977. – 488 с.
96. **Тихонов, В.И.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 2004. — 608 с.
97. **Тихонова, М. Р.** Анализ режимов работы кабельных линий электропередачи и разработка мероприятий по повышению их надежности / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург – 2013. – 125 с.
98. **Триска, Н.Р.** Синхронизация в телекоммуникациях нового поколения: обзор технологий и стандартов [Электронный ресурс] / Н.Р. Триска //Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ». – 2018. Точка доступа: URL : <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/129671/125185>. Дата обращения: 15.10.2019 г.
99. **Хуторцев, В.В.** Использование сплайнов для исследования алгоритмов нелинейной фильтрации / В.В. Хуторцев, В.Н. Таран // Радиотехника и электроника. — 1986.-Том 31.-№11.-С. 2180-2186
100. **Шаманов, В. И.** Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики : учебное пособие / В. И. Шаманов. – М.: 2013. – 244 с.
101. **Шандыбин, А.В.** Метод активной компенсации наведенных токов / А.В. Шандыбин // Известия ЮФУ. Технические науки. № 11 (172), 2015 г. – С. 109 – 119.
102. **Шандыбин, А.В.** Моделирование электромагнитного взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса / А.В. Шандыбин // Инновационные транспортные системы и технологии. - 2022. - Т. 8. - №3. - С. 89-104. doi: 10.17816/transsyst20228389-104.

103. **Шахгильдян, В.В.** Системы фазовой автоподстройки частоты / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин. – М. : Связь, 1972. – 446 с.
104. Широкополосные беспроводные сети передачи информации/ В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
105. **Шишигин, С.Л.** Математические модели и методы в задачах заземления и ЭМС / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков, Д.С. Шишигин // 4 Межд. конф. по молниезащите: Сб.мат-лов конф., СПб. – 2014. – С.128-135.
106. **Шишигин, С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2010. – №1. – С.16-23.
107. **Шишигин, С.Л.** Расчет заземлителей: учеб. пособие / С.Л. Шишигин. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – 119 с.
108. Экспериментальное исследование генерации хаотических колебаний в ансамбле двухкаскадно-связанных фазовых систем / В.Д. Шалфеев, К.Г. Мишагин, В.В. Матросов, В.В. Шохнин // Письма в ЖТФ. — 2005. Том 31. - вып. 24. С. 31-38
109. Экспертиза на электромагнитную совместимость технических решений, технических требований для инфраструктуры и подвижного состава, проведение аудита линейных предприятий и заводов-изготовителей / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, А. Б. Чегуров, М. Е. Бакин – М.: МИИТ, 2012. – 77 с.
110. **Эльсгольц, Л.Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц – М., 1969. – 424 с.
111. **Ярлыков, М.С.** Марковская теория оценивания случайных процессов / М.С. Ярлыков, М.А. Миронов. – М.: Радио и Связь, 1993. – 464 с.
112. **Carpenter, D. C.** The effects of magnetic saturation, hysteresis and eddy currents on rail track impedance / D. C. Carpenter, R. J. Hill // *Proceedings of IEEE/ASME joint Railroad Conference*, 1989, pp. 73-79.
113. **Carpenter, D. C.** FEM applied to track electrical impedance and adjacent track crosstalk modeling / D. C. Carpenter, R. J. Hill // *Proceedings of IEEE/ASME joint Railroad Conference*, 1991, pp. 87-95.

114. **Carpenter, D. C.** Railroad track electrical impedance and adjacent track crosstalk modeling using the finite element method of electromagnetic system analysis / D. C. Carpenter, R. J. Hill // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 4, 1993, pp. 555-562.
115. **Carson, J. R.** Wave propagation in overhead wires with ground return / J. R. Carson // *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 5, 1926, pp. 539-556.
116. **Courant, R.** Methods of Mathematical Physics. Volume 1. / R. Courant, D. Hilbert – Wiley Classics Edition, 1989. – 560 P.
117. **Cozza, Andrea.** Railways EMC : Assessment of Infrastructure Impact. Other / Andrea Cozza. – Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2005. English. – 171 P.
118. **Dunn, Patrick F.** Measurement and Data Analysis for Engineering and Science. 2nd ed. / Patrick F. Dunn – CRC Press, 2010. – 504 P.
119. Electrical material data for railway track transmission line parameter studies / R. J. Hill, S. Brillante , C. R. De Souza, P. J. Leonard // *IEE Proceedings on Electrical Power Applications*, Vol. 146, No.1, 1999, pp. 60-68.
120. FlowMesher: An automatic unstructured mesh generation algorithm with applications from finite element analysis to medical simulations / Z., Wang, A.R. Srinivasa, J.N. Reddy, A. Dubrowski // arXiv preprint arXiv:2103.05640. – 2021. – 38 P. DOI:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.05640>
121. **Fortin, S.** Analysis of Grounding Systems in Horizontal Multilayer Soils Containing Finite Heterogeneities / S. Fortin, N. Mitskevitch, F.P. Dawalibi // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2015. – Volume: 51, Issue: 6. – pp. 5095-5100.
122. **Hill, R. J.** Rail track admittance, earth leakage effects and track circuit operation / R. J. Hill , D. C.Carpenter , T. Tasar // *Proceedings of IEEE/ASME joint Railroad Conference*, 1989, pp. 55-62.
123. **Hill, R. J.** Rail track distributed transmission line impedance and admittance: theoretical modeling and experimental results / R. J. Hill , D. C.Carpenter // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 2, 1993, pp. 225-241.

124. **Hill, R.J.** Electric Railway Traction: Part 6 Electromagnetic Compatibility - Disturbance sources and equipment susceptibility / R.J. Hill // *IEE Power Engineering Journal*, February – 1997. – Vol. 11. – No. 1. – pp. 31-39.
125. **Hill, R.J.** Electric Railway Traction: Part 7 Electromagnetic Interference in Traction Systems / R.J. Hill // *IEE Power Engineering Journal*, December 1997. – Vol. 11. – No. 6. – pp. 259-266.
126. **Höllig, Klaus.** Finite Element Methods with B-Splines / Klaus Höllig – SIAM, 2003. – 156 P.
127. **Oura, Y.** Railway Electric Power Feeding Systems / Y. Oura, Y. Mochinaga, H. Nagasawa // *Japan Railway & Transport Review*, – 1998. – Vol. 16. – No. 10. – pp. 48-58.
128. **Papoulis, Athanasios.** Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. / Athanasios Papoulis – New York: McGraw-Hill, 1991. – 666 P.
129. **Taran, V.** Intellectualization of Methods for Reducing Electromagnetic Influences in Transport Systems / V. Taran, A. Shandybin, E. Kislovskiy // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2021. – C. 725-729. doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537402.
130. **Taran, V.** Using the Concept of Soft Computing to Solve the Problem of Electromagnetic Compatibility Control / V. Taran, A. Shandybin, E. Boyko // Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”(IITI'18) Volume 1 3. – Springer International Publishing, 2019. – pp. 390-400. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01818-4_39.
131. Transient Analysis of Soil Resistivity Influence on Lightning Generated Magnetic Field / F. Grange, S. Journet, S. Fortin, F.P. Dawalibi // International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA). – Belo Horizonte, Brazil, October 7-11, 2013. – pp.192-196.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Фрагменты программы вычисления электростатических и магнитостатических полей с применением метода конечных элементов, написанной на Mathcad

Расчет площади для каждого симплекса

$$\text{AREA}_1 := \frac{\left| \begin{bmatrix} x_{(M_{1,0})} - x_{(M_{1,1})} & y_{(M_{1,2})} - y_{(M_{1,1})} \\ x_{(M_{1,2})} - x_{(M_{1,1})} & y_{(M_{1,0})} - y_{(M_{1,1})} \end{bmatrix} \right|}{2}$$

Определение значений для элементов матрицы Дирихле - S - для каждого отдельного симплекса. В разьединном представлении.

$$s00_1 := \frac{1}{4 \cdot \text{AREA}_1} \cdot \left[\begin{bmatrix} y_{(M_{1,1})} - y_{(M_{1,2})} & y_{(M_{1,1})} - y_{(M_{1,2})} \\ x_{(M_{1,2})} - x_{(M_{1,1})} & x_{(M_{1,2})} - x_{(M_{1,1})} \end{bmatrix} \right]$$

.....

$$s22_1 := \frac{1}{4 \cdot \text{AREA}_1} \cdot \left[\begin{bmatrix} y_{(M_{1,0})} - y_{(M_{1,1})} & y_{(M_{1,0})} - y_{(M_{1,1})} \\ x_{(M_{1,1})} - x_{(M_{1,0})} & x_{(M_{1,1})} - x_{(M_{1,0})} \end{bmatrix} \right]$$

Объединение разрозненных элементов в матрицы S для каждого симплекса

$$s1_1 := \begin{pmatrix} s00_1 & s01_1 & s02_1 \\ s10_1 & s11_1 & s12_1 \\ s20_1 & s21_1 & s22_1 \end{pmatrix}$$

Получение общей матрицы S для всех симплексов в разьединном состоянии

$$Sd := \begin{cases} \text{Sd}_{\max_i3+2, \max_i3+2} \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0.. \max_i \\ \text{for } i \in 0.. 2 \\ \text{for } j \in 0.. 2 \\ \quad Sd_{k-3+i, k-3+j} \leftarrow (S1_k)_{i,j} \end{cases} Sd$$

Получение матрицы объединений из исходных данных

$$C := \begin{cases} \text{for } k \in 0.. \max_i \\ \text{for } i \in 0.. 2 \\ \text{for } j \in 0.. \max_i \\ \quad C_{k-3+i, j} \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{if } j = \text{Simplex}_{k,i} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} C$$

Вычисление объединенной матрицы Дирихле, включающей все симплексы

$$S := C^T \cdot Sd \cdot C$$

Задание матрицы T для каждого симплекса - выполняется умножением элементов матрицы t на удвоенную площадь симплекса.

$$t := \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$T := \begin{cases} \text{for } k \in 0.. \max_i \\ \text{for } i \in 0.. 2 \\ \text{for } j \in 0.. 2 \\ \quad T_{k-3+i, k-3+j} \leftarrow 2 \cdot \text{AREA}_k \cdot (t)_{i,j} \end{cases} T$$

Выполнение разделения матрицы Дирихле на 4 подматрицы. Где f - индекс свободных узлов, а p - фиксированных

$$\begin{pmatrix} S_{ff} & S_{fp} \\ S_{pf} & S_{pp} \end{pmatrix}$$

Подматрица свободных строк и фиксированных столбцов

$$Sfp := \begin{cases} Sfp1 \leftarrow \text{submatrix}(S, Uf_nomer_0, Uf_nomer_0, 0, \max_M) \\ \text{for } k \in 1.. \max_uf \\ \quad \text{if } \max_uf > 0 \\ \quad Sfp1 \leftarrow \text{stack}(Sfp1, \text{submatrix}(S, Uf_nomer_k, Uf_nomer_k, 0, \max_M)) \\ Sfp \leftarrow \text{submatrix}(Sfp1, 0, \max_uf, Up_nomer_0, Up_nomer_0) \\ \text{for } k \in 1.. \max_up \\ \quad \text{if } \max_up > 0 \\ \quad Sfp \leftarrow \text{augment}(Sfp, \text{submatrix}(Sfp1, \max_uf, Up_nomer_k, Up_nomer_k)) \end{cases} Sfp$$

Вычисление первого слагаемого правой части (магнитное влияние)

$$K := C^T \cdot T \cdot Jd$$

Для последующего решения из полученного вектора первых слагаемых необходимо оставить только те, что соответствуют узлам со свободными потенциалами и отбросить значения от узлов с фиксированными потенциалами

$$Kf := \begin{cases} Kf_0 \leftarrow K_{(Uf_nomer_0)} \\ \text{for } i \in 1.. \max_uf \\ \quad \text{if } \max_uf > 0 \\ \quad Kf \leftarrow \text{stack}(Kf, \text{submatrix}(K, Uf_nomer_i, Uf_nomer_i, 0, 0)) \end{cases} Kf$$

Вычисление правой части уравнения $\text{Sff} \cdot u = \mu_0 \cdot (C^T \cdot T \cdot Jd)^{\langle \text{fre} \rangle} - \text{Sfp} \cdot U_p$, где $(\bullet)^{\langle \text{fre} \rangle}$ обозначены только элементы для свободных узлов. Решение делаем в два шага: 1 - вычисление правой части - обозначим как uf , 2 - умножение на обратную матрицу Sff^{-1} .

$$uf := (\mu_0 \cdot Kf - \text{Sfp} \cdot U_p) \quad u := \text{Sff}^{-1} \cdot uf$$

Таким образом рассчитаны искомые потенциалы для всех свободных узлов.

Объединив в единый вектор полученные значения и заданные получаем вектор потенциалов для всех узлов системы

```
Potent2 :=
  for i ∈ 0..max_up
    Potent2(U_p_nomef) ← U_p_i
  for i ∈ 0..max_uf
    Potent2(U_f_nomef) ← u_i
  Potent2
```

Иллюстрация полученных потенциалов:

Задаем функцию, вычисляющую значение потенциала в точке с координатами (x, y) . Для каждой точки производится определение принадлежности к симплексу и расчет только при выполнении условия принадлежности.

```
Φ(x,y) :=
  Φ ← min(Potent2)
  for i ∈ 0..max_i
    Eps0 ← [X2_i·Y3_i - X3_i·Y2_i + (Y2_i - Y3_i)·x + (X3_i - X2_i)·y] / Det_i
    Eps1 ← [X3_i·Y1_i - X1_i·Y3_i + (Y3_i - Y1_i)·x + (X1_i - X3_i)·y] / Det_i
    Eps2 ← [X1_i·Y2_i - X2_i·Y1_i + (Y1_i - Y2_i)·x + (X2_i - X1_i)·y] / Det_i
    Φ ← Potent2(M^{(0)})_i · Eps0 + Potent2(M^{(1)})_i · Eps1 + Potent2(M^{(2)})_i · Eps2 if (0 ≤ Eps0 ≤ 1) ∧ (0 ≤ Eps1 ≤ 1) ∧ (0 ≤ Eps2 ≤ 1)
  Φ
```

Переводим непрерывную функцию в дискретное значение для иллюстрации

```
F :=
  for i ∈ 0, 1.. (max(x) - min(x)) / 0.05
    for j ∈ 0, 1.. (max(y) - min(y)) / 0.05
      F_i,j ← Φ(min(x) + 0.05i, min(y) + 0.05j)
  F
```

Проверка программы вычислений электростатических и магнитостатических полей с применением метода конечных элементов (Mathcad)

Проверку точности работы программы проведем с применением тестового примера – задачи определения магнитного поля в коаксиальном проводнике. Данная задача имеет аналитическое решение, представленное ниже.

Аналитическое решение

Задачи определения магнитного поля выполняется в результате решения векторного уравнения Пуассона–Лапласа:

$$\nabla^2 A = -\mu_0 \mu_1 j,$$

где ∇^2 – оператор Лапласа (Лапласиан);

A – векторный потенциал;

μ_0 – магнитная постоянная;

μ_1 – относительная магнитная проницаемость;

j – плотность тока.

Рассмотрим коаксиальную структуру, представленную на рисунке A1 [14].

Определим плотность тока в центральном проводнике. Задавая силу тока I и, зная площадь центрального проводника πa_1^2 , плотность тока \mathbf{j} будет равна:

$$\mathbf{j} = \frac{I}{\pi a_1^2}.$$

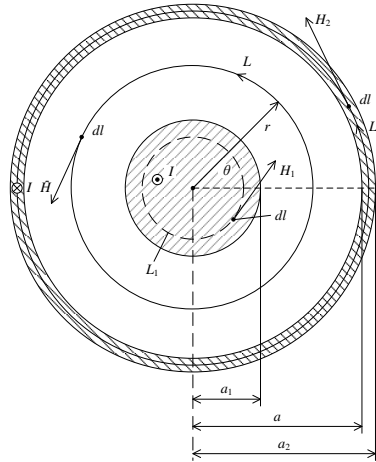


Рисунок А.1 – Коаксиальная структура

Векторный потенциал **внутри центрального проводника** имеет следующий вид:

$$A_z = -\frac{\mu_0 \mu_1 I r^2}{4\pi a_1^2}, \quad \text{при } r \leq a_1.$$

Векторный потенциал **между проводниками** будет равен

$$A_z = -\frac{\mu_0 I r^2}{4\pi a_1^2} \left(\mu_1 + 2 \ln \frac{r}{a_1} \right).$$

Векторный потенциал **в толще трубы** получается:

$$A_z = -\frac{\mu_0 \mu_1 I r^2}{4\pi a_1^2} \left(\frac{a_2^2 - r^2}{a_2^2 - a^2} + \frac{2a_2^2}{a_2^2 - a^2} \ln \frac{r}{a} + \frac{2}{\mu_1} \ln \frac{a}{a_1} \right).$$

За пределами трубы с внешней стороны векторный потенциал постоянный:

$$A_{z \text{ внешн}} = -\frac{\mu_0 \mu_1 I a_2^2}{2\pi a_1^2} \left(\frac{a_2^2}{a_2^2 - a^2} \ln \frac{a_2}{a} + \frac{1}{\mu_1} \ln \frac{a}{a_1} \right) = \text{const.}$$

Далее необходимо сравнить аналитические решения с численными, полученными методом конечных элементов.

Пример работы программы на языке Mathcad

Задача: Моделирование магнитостатического потенциала внутри центрального проводника коаксиальной линии. Проводник имеет радиус $a_1 = 4$ мм. Сила тока, протекающего в нем, $I = 1$ А. По внешнему проводнику ток протекает в обратном направлении.

Векторный потенциал аналитически определяется выражением:

$$A_z = -\frac{\mu_0 \mu_1 I r^2}{4\pi a_1^2}, \quad \text{при } r \leq a_1.$$

Вычисление с помощью МКЭ подразумевает необходимость задать начальные и граничные условия. Для использования предлагаемой программы также необходимо задать сетку конечных элементов с указанием координат узлов.

В качестве начальных условий для данной задачи выступает значение силы тока. Граничными условиями являются значения потенциалов в центральной точке и на границе области. Эти величины берутся из аналитического решения и считаются программой заданными.

Результат моделирования

Представлен в виде графика поверхности и контурного графика.

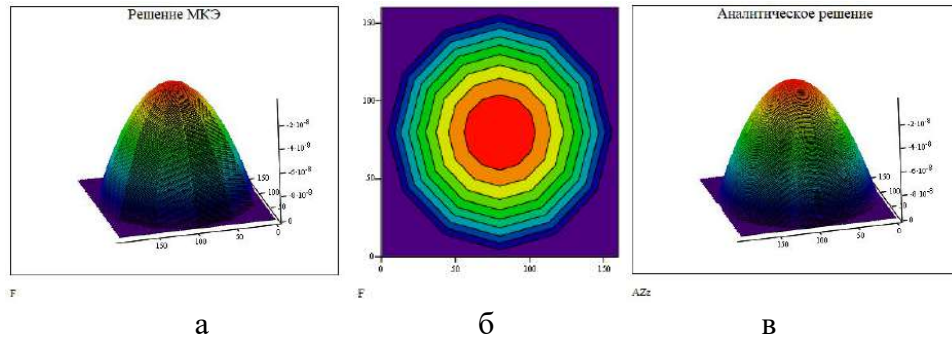
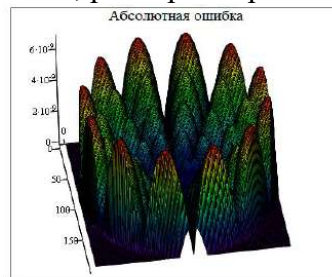


Рисунок А.2 – Результат моделирования магнитостатического поля в центральном проводнике коаксиальной структуры: а – график поверхности; б – контурный график; в – аналитическое решение

Результат получаемый в ходе аналитического решения визуально не отличается от результата моделирования.

Однако, расчет погрешности вычислений дает следующие результаты:

- абсолютная ошибка в виде разности между аналитическим и модельным решением явилась следствием укрупнения симплексов по мере приближения их к внешнему кругу и может быть уменьшена изменением количества, размеров и расположения конечных элементов.



А.3 - F

Рисунок А.3 – Величина абсолютной ошибки
Сетка для данной модели выполнена следующего вида.

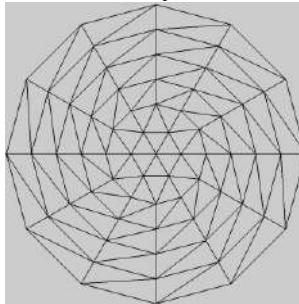


Рисунок А.4 – Сетка для МКЭ

- относительная ошибка, определяемая формулой

$$\delta_{\text{отн}} := \frac{\sum_{i=0}^{N1-1} \sum_{j=0}^{N2-1} \left[(F_{i,j})^2 - (AZ_{z,i,j})^2 \right]}{\sum_{i=0}^{N1-1} \sum_{j=0}^{N2-1} \left[(AZ_{z,i,j})^2 \right]} \cdot 100 = 6.068 \%$$

имеет значение 6,068%. Данная ошибка также может быть уменьшена в результате увеличения количества рассчитываемых симплексов [90].

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Фрагменты программы вычислений электростатических и магнитостатических полей с применением метода конечных элементов, написанной на C++

Программа состоит из главного исполняемого файла и ряда подпрограмм в дополнительных файлах.

1. Главный файл

```
int main()
{
    setlocale ( LC_ALL, "Russian");
    cout << " начало\n";
    int i, j;
    MESHIN();
    SZERO();

    for (i=0;i<=NELMTS;i++)
    {
        ELMATR(i); //для конкретного
        треугольного элемента (№ 0-4)
        ELEMBD(i);
    }
    EQSOLV();

    Ekvipotential();
    GRAD();
    MAGNIT();
    OUTPUT();
    return 0;
}
```

2. Фрагмент подпрограммы MESHIN для считывания данных из внешних файлов

```
in_stream.open( "infile.dat");
if (!in_stream.is_open())
{
    cout << "File input was not opened";
}
NODES=0;
do
{
    for (j=0;j<=2;j++)
    {
        in_stream >> K;
        if (j==0)
            NODES=K;
        else if (j==1)
            x[NODES]=K;
        else if (j==2)
            y[NODES]=K;
            K=0;
    }
}
while (!in_stream.eof()); //цикл чтения
до обнаружения конца файла
cout <<"Считано " << NODES+1<<"
узлов. \n\n" ;
in_stream.close();
```

3. Подпрограмма SZERO для подготовки пустых матриц для решения уравнений

```
void SZERO()
{
    setlocale ( LC_ALL, "Russian");
    cout << " выполнение SZERO\n";
    int i=0, j=0;

    //Обнуление каждого элемента S
    for (i=0;i<=NODES;i++)
        for (j=0;j<=NODES;j++)
            s[i][j]=0;
    //Обнуление правой части
    for (i=0;i<=NODES;i++)
        RTHDSD[i]=0;
}
```

4. Подпрограмма ELMATR для заполнения матриц S и T для одного симплекса

```
void ELMATR(int IE)
{
    setlocale ( LC_ALL, "Russian");
    //Построение матричных элементов S
    и T для одного треугольного
    //элемента первого порядка.
    IE=номер элемента
    int i, j, k, l, m, I1, I2, I3, I4, NVRTEX;
    // Установка индексов для
    треугольника
    i = NVTX[0][IE];
    j = NVTX[1][IE];
    k = NVTX[2][IE];
    Det_E[IE]=x[i]*y[j]-x[j]*y[i]-
    x[i]*y[k]+x[k]*y[i]+x[j]*y[k]-
    x[k]*y[j]; //задание определителя
    Det_E для последующих применений
    //Вычисление T - матрицы
    элементов (метрической)
    AREA=abs((x[j]-x[i])*(y[k]-y[i])-(x[k]-
    x[i])*(y[j]-y[i]))/2;

    for (l = 0; l < NVE; l++ )
    {
        for (m = 0; m < NVE; m++ )
            TELM[l][m] = AREA / 12;
            TELM[l][1] = 2 * TELM[l][1];
    }
    //Вычисление S - матрицы элементов
    (Дирихле)
    // Установка начальных значений
    I1 = 0;
    I2 = 1;
    I3 = 2;
    for (l = 0; l < NVE; l++ )
        for (m = 0; m < NVE; m++ )
            SELM[l][m] = 0;
            for ( NVRTEX = 0 ; NVRTEX<=2;
            NVRTEX++)
            {
                CTNG=((x[j]-x[i])*(x[k]-x[i])+(y[j]-
                y[i])*(y[k]-y[i]))/(2*AREA);
                CTNG2=CTNG/2;
            }
            SELM[I2][I2] = SELM[I2][I2] +
            CTNG2;
            SELM[I2][I3] = SELM[I2][I3] -
            CTNG2;
            SELM[I3][I2] = SELM[I3][I2] -
            CTNG2;
            SELM[I3][I3] = SELM[I3][I3] +
            CTNG2;
            //Перестановка индексов строк и
            столбцов
            I4 = I1;
            I1 = I2;
            I2 = I3;
            I3 = I4;
            l = i;
            i = j;
            j = k;
            k = l;
        }
    }
}
```

5. Подпрограмма ELEMBD для сбора глобальной матрицы S и составления правой части уравнения

```
void ELEMBD(int IE)
{
    setlocale ( LC_ALL, "Russian");
    int i=0,j=0, IROW=0, ICOL=0;
    float Mu=1.256e-006;

    //Перебор матричных элементов и
    корректировка глобальной матрицы и
    правой части
    for ( i=0; i<NVE; i++ )
    {
        IROW = NVTX[i][IE];

        //Строка соответствует
        фиксированному потенциалу?
        if (CONSTR[IROW]==1) goto
        METKA50;
        // Нет потенциал переменный,
        просмотр NVE -столбцов
        for ( j = 0; j<NVE; j++)
```



```

{
ICOL = NVTX[j][IE];
///Столбец соответствует
фиксированному потенциалу?
if (CONSTR[ICOL]==1) goto
METKA30;
///Нет, тогда увеличение S и
RTHDSD
s[IROW][ICOL] = s[IROW][ICOL] +
SELM[i][j];
RTHDSD[IROW] = RTHDSD[IROW] +
TELM[i][j]*SOURCE[IE];
goto METKA40;
///Да, тогда увеличение только правой
части
METKA30;
RTHDSD[IROW] = RTHDSD[IROW] +
TELM[i][j]*SOURCE[IE]-
SELM[i][j]*POTENT[ICOL];
METKA40;
}
goto METKA60;
///Установка глобальной матрицы для
заданного узла
METKA50;
s[IROW][IROW] = 1;
RTHDSD[IROW] = POTENT[IROW];
METKA60;
}
/// Все выполнено - возврат в
вызывающую программу
}

```

6. Подпрограмма EQSOLV для вычисления значений искомых потенциалов

```

void EQSOLV()
{
setlocale ( LC_ALL, "Russian");
float SUM;
int i=0,j=0, IROW1=0, IROW=0, ICOL,
ICOL1, k;
s[0][0] = sqrt(s[0][0]);///извлечение кв.
корня
s[1][0] = s[1][0]/s[0][0];///деление
s[0][1] = s[1][0];
s[1][1] = sqrt(s[1][1]-
(s[1][0]*s[1][0]));///извлеч корн и
возведение в квадрат
for (IROW = 2; IROW <= NODES;
IROW++)
{
IROW1=IROW-1;
s[IROW][0]=s[IROW][0]/s[0][0];
s[0][IROW]=s[IROW][0];
for (ICOL = 1; ICOL <=IROW1;
ICOL++)
{
ICOL1=ICOL-1;
SUM=0;
for ( k= 0; k<= ICOL1; k++)
SUM=SUM+s[IROW][k]*s[ICOL][k];
s[IROW][ICOL] = (s[IROW][ICOL]-
SUM)/s[ICOL][ICOL];
s[ICOL][IROW] = (s[IROW][ICOL]);
SUM=0;
for (k= 0; k<= IROW1; k++)
{
SUM=SUM+s[IROW][k]*s[IROW][k];
}
s[IROW][IROW]=sqrt(s[IROW][IROW]-
SUM);
}
/// Прямое исключение. Происходит
разрушение RTHDSD. Это получение
z
RTHDSD[0]= RTHDSD[0]/s[0][0];
for (IROW=1; IROW<=NODES;
IROW++)
{
IROW1=IROW-1;
SUM=0;
for(ICOL=0; ICOL<=IROW1; ICOL++)
SUM=SUM+s[IROW][ICOL]*RTHDSD
[ICOL];
}
RTHDSD[IROW]=(RTHDSD[IROW]-
SUM)/s[IROW][IROW];
}
/// Обратная подстановка.
Используется верхний треугольный
множитель. Это получение x
POTENT[NODES]=RTHDSD[NODES]
/s[NODES][NODES];
for ( k= 0; k<= NODES; k++)
{
IROW=NODES-k;
SUM=0;
IROW1=IROW+1;
for(ICOL=IROW1; ICOL<=NODES;
ICOL++)
{
SUM=SUM+s[IROW][ICOL]*POTENT
[ICOL];
}
POTENT[IROW]=(RTHDSD[IROW]-
SUM)/s[IROW][IROW];
}
}

```

7. Подпрограмма Ekvipotential определяет координаты точек на ребрах симплексов для визуализации эквипотенциальных уровней
8. Подпрограмма GRAD определяет координаты точек на ребрах симплексов для визуализации линий напряженности
9. Подпрограмма MAGNIT используется для расчета величины и угла наклона векторов напряженностей магнитного поля
10. Фрагмент подпрограммы OUTPUT для вывода результатов вычислений во внешние файлы:

```

out_stream.open("outfile.dat");
if (!out_stream.is_open())
{
cout << "outfile.dat file was not opened";
}
for (i=0;i<=NODES;i++)
{
out_stream << POTENT[i] << "\n";
}
out_stream.close();

```

11. Дополнительный заголовочный файл Headers.h

```

void Ekvipotential();
void ELEMBD(int IE);
void ELMATR(int IE);
void EQSOLV();
void MESHIN();
void OUTPUT();
void SZERO();
void GRAD();
void Poisk_Nachalo(float Dlina_min,
float Dlina_max);
void Proverka(float X, float Y);
int Proverka_One(float X, float Y,int j);
void Postroenie();
void Raschet_NT(int j);
void FiltrMaxGrad(int K);
float Potential(float X, float Y, int K);
void LokalGrid(float X, float Y, int L0,
int L1, int L2, int K);
void MAGNIT();
void Magn_Napr();
void Proverka_Magn(float X, float Y);
void LokalGrid_Magn(float X, float Y,
int L0, int L1, int L2, int K);
#endif // HEADERS_H_INCLUDED

```

12. Визуализация эквипотенциальных уровней производится отдельной программой.

Проверка результатов

Для исходных данных задачи, рассмотренной в приложении А, визуализация рассчитанных эквипотенциальных уровней представлена на рисунке Б.1. Цветами от красного к синему обозначены уровни от максимального к минимальному.

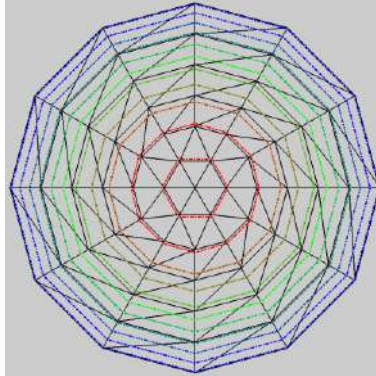


Рисунок Б.1 – Эквипотенциальные уровни магнитостатического поля в центральном проводнике коаксиальной структуры

Построение поверхности средствами Mathcad для полученных расчетных величин дают график идентичный полученному в Приложении А и аналитической форме.

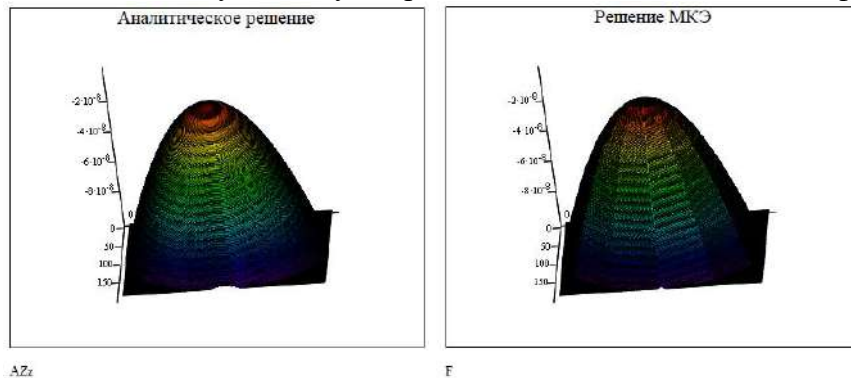
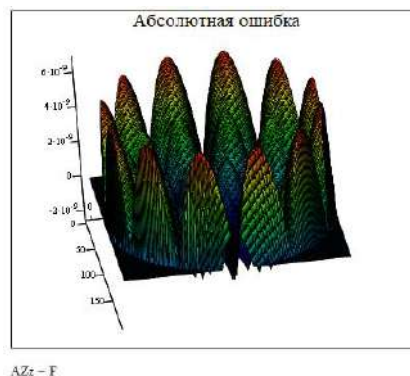


Рисунок Б.2 – Результат моделирования в Mathcad по данным из C++

Ошибки также сопоставимы:

- абсолютная ошибка



AZz - F

Рисунок Б.3 – Результат вычисления абсолютной ошибки

- относительная ошибка

$$\delta_{\text{отн}} := \frac{\sum_{i=0}^{N1-1} \sum_{j=0}^{N2-1} \left[(F_{1,j})^2 - (AZz_{1,j})^2 \right]}{\sum_{i=0}^{N1-1} \sum_{j=0}^{N2-1} \left[(AZz_{1,j})^2 \right]} \cdot 100 = 4.169 \cdot$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Математическое моделирование участка железной дороги

Рассмотрим выполненное математическое моделирование участка железной дороги, профиль которого показан на рисунке В.1. В качестве системы питания на участке выбрана наиболее распространенная – система переменного тока 27,5 кВ. Данная система с точки зрения распространения электромагнитного поля является несбалансированной, т.к. в качестве прямого провода используется контактный провод, подвешенный на опорах на высоте 6 м над землей, а обратными проводниками являются рельсы. В зону действия порождаемого электромагнитного поля попадает кабельная линия, расположенная на глубине 1 м под землей и отнесенная от крайнего рельса на 5 м.

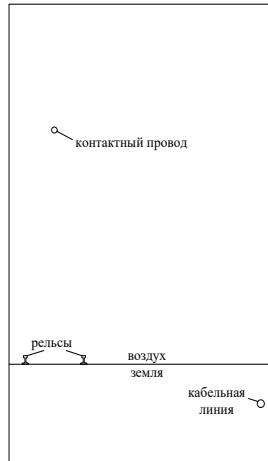


Рисунок В.1 – Геометрическое представление модели

Отметим, что модель может иметь любые внешние геометрические границы, так как расчет выполняется с применением МКЭ. Представление как на рисунке В.1 лишь нагляднее.

В качестве источников электромагнитного влияния: выступают контактный провод и рельсы. Контактный провод для модели выполнен медным проводом круглого сечения с радиусом 5,6 мм, что эквивалентно по сечению медному фасованному контактному проводу МФ-100 с удельным электрическим сопротивлением 0,0177 мкОм·м.

Каждый рельс в модели выполнен из стали с соблюдением основных геометрических размеров для марки Р-50. Расстояние между ними 1520 мм. Удельное электрическое сопротивление стали 0,12 мкОм·м.

Воздух по параметрам соответствует идеальному диэлектрику.

Рельсы имеют непосредственный гальванический контакт с землей, которая представлена однородной глиной. Удельное электрическое сопротивление глины 20 Ом·м. Так как в действительности рельсы размещаются на специально уложенной балластной призме, то для имитации ее наличия между подошвой рельс и землей размещен тонкий слой с повышенным сопротивлением по параметрам соответствующий 0,5 м балластной призмы с удельным электрическим сопротивлением 1 кОм·м.

Кабельная линия, на примере МКПпАБпШп 7х4х1,05+5х2х0,7+1х0,7, включает в себя следующие компоненты:

- жилы из мягкой медной проволоки;
- трёхслойная полиэтиленовая изоляция жил;
- звездные четверки, скрученные из четырех изолированных жил вокруг корделя-заполнителя;
- сердечник, скрученный из семи звездных четвёрок и пяти вспомогательных пар 2*0,7мм и одной вспомогательной жилы диаметром 0,7мм;
- поясная изоляция, выполненная из спирально наложенных лент кабельной бумаги;

- оболочка из алюминиевой трубки;
- подушка из битума;
- броня стальная или из стальных оцинкованных лент;
- подушка из битума;
- наружный покров в виде шланга из пленки высокого давления.

В качестве объекта, по которому оценивался результат воздействия генерируемого электромагнитного поля, выбрана стальная броня. Так как данный слой является первым металлическим слоем и выполняет функции защиты как от механических повреждений, так и от влияний внешних полей. Следовательно, оказываемые на него воздействия наибольшие, а их результатом является, протекающий в оболочке, наведенный ток. Для моделирования в качестве стальной оболочки выбрана стальная труба с внутренним радиусом 20 мм и толщиной 1 мм. Удельное электрическое сопротивление так же 0,12 мкОм·м. Так как кабель находится в земле и имеет внешнюю изоляцию, то для ее имитации использован аналогичный тонкий слой с повышенным сопротивлением по параметрам соответствующий 5 мм изоляционного материала с удельным электрическим сопротивлением 73,83 Ом·м.

Помимо указанных геометрических размеров объектов для модели также важную роль играет протяженность. Моделирование плоского случая позволяет понять общие принципы распределения полей от параллельно расположенных проводников, что косвенно дает возможность определения степени влияния на смежные линии через проведение дополнительных вычислений. Однако такой подход вносит некоторую ошибку, обусловленную исключением подверженных влиянию линий из вычисления распределения электромагнитных полей. Включение кабельной линии в расчетную модель направлено на устранение погрешности в расчете распределения токов, электромагнитных полей и одновременно позволяет определить величину наведенного влияния. Выполнить такое включение становится возможным при переходе к трехмерной модели.

Реальные железнодорожные участки, расположенные между соседними станциями, занимают десятки километров. Однако, такая протяженность для математической модели с высокой степенью детализации элементов на текущем этапе развития вычислительной техники нереализуема.

В связи с чем было предложено выполнить моделирование небольшого участка железнодорожного пути с последующей экстраполяцией результатов.

Моделирование произведено с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics [102]. В данном комплексе помимо задания геометрических размеров модели и указания параметров материалов также необходимо выбрать режим вычисления и настроить соответствующие физическим процессам модули, которые в свою очередь определяют решаемые уравнения. Рассмотрим данные настройки подробнее.

Для вычисления исследуемой модели выбран стационарный гармонический режим с расчетами на частоте основной гармоники питающего тока, т.е. 50 Гц. При этом использованы такие модули как «Магнитные поля» (Magnetic Fields), «Электрические токи» (Electric Currents), «Электрическая цепь» (Electrical Circuit) и «Мультифизика» (Multiphysics) из специализированного пакета модулей AC/DC.

Применение данных модулей также подразумевает, что расчет проводится в квазистатическом режиме с допущением, что токи и заряды, генерирующие поля, изменяются во времени так медленно, что электромагнитные поля одинаковы на всем протяжении в каждый момент времени, как если бы они были созданы стационарными источниками. Для частот промышленной частоты с незначительными размерами модели такое допущение приемлемо и позволяет упростить расчеты.

Рассмотрим по порядку использованные модули и их конфигурацию для исследуемой модели.

Модуль «Магнитные поля» содержит уравнения, граничные условия и токи для моделирования магнитных полей с расчетом магнитного векторного потенциала. Основной

особенностью является функция закона Ампера (Ampère's Law), которая добавляет уравнение для магнитного векторного потенциала и обеспечивает возможность вычисления определяющих соотношений и связанных с ними свойств, таких как относительная магнитная проницаемость.

Уравнения, входящие в модуль «Магнитные поля», включают:

– уравнение связи между напряженностью магнитного поля \mathbf{H} и плотностью электрического тока \mathbf{J} :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (\text{B.1})$$

где ∇ – оператор Набла;

– уравнение связи между магнитной индукцией \mathbf{B} и векторным потенциалом магнитного поля \mathbf{A} :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}; \quad (\text{B.2})$$

– выражение для связи плотности тока \mathbf{J} с напряженностью электрического поля \mathbf{E} и электрической индукцией \mathbf{D} :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e, \quad (\text{B.3})$$

где σ – удельная проводимость среды;

\mathbf{J}_e – вектор внешней плотности тока;

$\sigma \mathbf{E}$ – характеризует плотность тока проводимости;

$j\omega \mathbf{D}$ – характеризует плотность тока смещения;

– уравнение взаимосвязи напряженности электрического поля \mathbf{E} с магнитным векторным потенциалом \mathbf{A} :

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A}. \quad (\text{B.4})$$

В частности, подмодуль «Закон Ампера» является базовым, накладываемся на все элементы модели и учитывает выражения (B.1)-(B.4) с условием отсутствия вектора внешней плотности тока $\mathbf{J}_e = 0$, который при необходимости может быть указан в отдельном подмодуле.

В этом подмодуле также указываются глобальные зависимости для моделей:

– намагничиваемости

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (\text{B.5})$$

где μ_r – относительная проницаемость, которая берется применительно к конкретному материалу;

– проводимости

$$\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E}; \quad (\text{B.6})$$

– диэлектрика

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (\text{B.7})$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, которая берется применительно к конкретному материалу;

Подмодуль «Магнитная изоляция» (Magnetic Insulation) добавляет частный случай граничного условия магнитного потенциала, которое устанавливает тангенциальные компоненты магнитного потенциала равными нулю на границе

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \quad (\text{B.8})$$

где \mathbf{n} – вектор нормали поверхности.

Он используется для моделирования металлических поверхностей без потерь или в качестве граничного условия типа симметрии, налагает симметрию на магнитные поля и «магнитные токи». В переходной и временной гармонических формулировках это также накладывает антисимметрию на электрические поля и электрические токи. Он поддерживает индуцированные поверхностные электрические токи, и, таким образом, любые заданные или индуцированные электрические токи (объемные, поверхностные или краевые токи), втекающие в идеальную границу электрического проводника, автоматически уравниваются индуцированными поверхностными токами.

Подмодуль «Магнитная изоляция» является базовым и для него автоматически выбираются все внешние границы.

Подмодуль «Проводник» (Coil) моделирует проводящий (например, металлический) элемент, подверженный сосредоточенному возбуждению, такому как напряжение или ток. Указанное возбуждение преобразуется в ток проводимости, протекающий в элементе. Данный подмодуль является вспомогательным, применяется поверх подмодуля закона Ампера, и может локально скорректировать законы намагничивания и проводимостей. В рамках данного подмодуля указывается элемент привязки, расположение входов, выходов и тип прикладываемого возбуждения.

Для каждого элемента, входящего в модель, выделен отдельный подмодуль «Проводник» с указанием расположения портов. В качестве прикладываемого возбуждения использованы уровни тока, определяемые в модуле Электрическая цепь, который будет рассмотрен ниже.

Еще один подмодуль, относящийся к модулю Магнитные поля, который использован для реализации модели участка железной дороги, называется «Граничное условие перехода» (Transition Boundary Condition).

Данный подмодуль применен на внутренних границах для моделирования слоя среды, который должен быть геометрически тонким, но не должен быть тонким в электрическом отношении. Он представляет собой разрыв в тангенциальном электрическом поле. Математически это описывается соотношением между скачком электрического поля и плотностью индуцированного поверхностного тока следующими выражениями:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{J}_{s1}; \quad (\text{B.9})$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H}_2 = \mathbf{J}_{s2}, \quad (\text{B.10})$$

где индексы 1 и 2 относятся к разным сторонам слоя;

$\mathbf{J}_{s1}, \mathbf{J}_{s2}$ – вектора поверхностных токов для соответствующих слоев;

$$\mathbf{J}_{s1} = \frac{(Z_S \mathbf{E}_{t1} - Z_T \mathbf{E}_{t2})}{Z_S^2 - Z_T^2} + \mathbf{J}_{s01}; \quad (\text{B.11})$$

$$\mathbf{J}_{s2} = \frac{(Z_S \mathbf{E}_{t2} - Z_T \mathbf{E}_{t1})}{Z_S^2 - Z_T^2} + \mathbf{J}_{s02}, \quad (\text{B.12})$$

где $\mathbf{E}_{t1}, \mathbf{E}_{t2}$ – вектора амплитуд тангенциального электрического поля, для соответствующих слоев;

$\mathbf{J}_{s01}, \mathbf{J}_{s02}$ – вектора плотностей поверхностного тока со стороны соответствующего слоя;

Z_S – поверхностное сопротивление;

$$Z_S = \frac{-j\omega\mu}{k} \frac{1}{\tan(kd)}; \quad (\text{B.13})$$

Z_T – передаточное сопротивление;

$$Z_T = \frac{-j\omega\mu}{k} \frac{1}{\sin(kd)}, \quad (\text{B.14})$$

где d – толщина поверхности;

k – волновое число для границы перехода;

$$k = \omega \sqrt{\left(\varepsilon + \left(\frac{\sigma}{j\omega} \right) \right) \mu}. \quad (\text{B.15})$$

Таким образом подмодуль «Граничное условие перехода» используется в модели для имитации балластного слоя и слоя кабельной изоляции.

Модуль «Электрические токи» содержит уравнения, граничные условия и источники тока для моделирования электрических токов в проводящих средах с расчетом электрического потенциала. Основную функцию выполняет подмодуль «Сохранение тока» (Current Conservation). Он добавляет уравнение непрерывности для электрического потенциала, позволяет настроить выражения электропроводности, а также основные

соотношения для поля электрического смещения и связанных с ним свойств материала, таких как относительная диэлектрическая проницаемость.

Уравнения, входящие в модуль Электрические токи, включают:

– балансное уравнение для плотности электрического тока \mathbf{J} :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v}, \quad (\text{B.16})$$

где $Q_{j,v}$ – плотность объемного заряда;

– выражение для плотности тока \mathbf{J} , аналогичное (B.6);

– уравнение для определения напряженности электрического поля \mathbf{E} через градиент потенциала V :

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (\text{B.17})$$

Подмодуль «Сохранение тока» как видно из названия описывает закон сохранения тока в модели, является базовым, накладывается на все элементы модели и учитывает выражения (B.6), (B.16) и (B.17), дополняемые глобальными зависимостями. Для модельного примера это зависимости (B.9) для описания свойств электрической проводимости и (B.10) для диэлектрических свойств.

Подмодуль «Электрическая изоляция» (Electric Insulation), является базовым, описывает граничные условия электрической изоляции, задаваемые по умолчанию, в виде выражения:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (\text{B.18})$$

Это граничное условие означает, что через данную границу не протекает электрический ток. На внутренних границах это означает, что ток не может протекать через границу и что электрический потенциал на границе прерывистый. Данный подмодуль применяется по умолчанию ко всем внешним границам модели.

Для модельной задачи в дополнение к базовым необходимо добавить подмодуль «Земля» (Ground), который является граничным условием по умолчанию и реализует землю как граничное условие с нулевым потенциалом $V = 0$.

Данный подмодуль подключается ко всем внешним стенкам модели, находящимся ниже уровня поверхности. Он позволяет току, стекающему с рельс, распространяться в любом направлении в толще земли, как это происходит в действительности.

Подмодули «Земля» и «Электрическая изоляция» по своей функции противоположны и, во избежание неоднозначности, указание какой-либо поверхности в первом отменяет для нее действие второго подмодуля.

С целью обеспечения взаимодействия подключенных модулей «Магнитные поля» и «Электрические токи» добавляется модуль «Мультифизика» (Multiphysics). Он не относится к пакету AC/DC, но в зависимости от подключенных к модели физических модулей предлагает различные варианты подмодулей. Для рассматриваемой задачи требуется подключить «Компонент плотности индукционного тока» (Induction Current Density Component), осуществляющий внутримодельную передачу значений плотности тока из модуля «Магнитные поля» в «Электрические токи» в качестве внешней плотности тока:

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \nabla V. \quad (\text{B.19})$$

Подмодуль «Мультифизика» подключается ко всем токопроводящим элементам модели.

Третьим необходимым для модели компонентом из пакета AC/DC является модуль «Электрическая цепь», который содержит уравнения для моделирования электрических цепей с подключением или без подключения к модели с распределенными полями и определяет напряжения, токи и заряды, связанные с элементами схемы. С помощью этого модуля описана гальваническая связь между моделируемыми объектами, которые в модуле «Магнитные поля» были выбраны в подмодулях типа «Проводник». Также в нем располагаются элементы, не вошедшие в геометрическую модель в явном виде. Это тяговая подстанция, подключенная к контактному проводу, рельсам и заземлению, с одной стороны и электроподвижной состав, замыкающий цепь тягового питания, с другой стороны. Кроме

того, оболочка исследуемой кабельной линии имеет заземления с обоих концов, что также реализуется по средствам элементов в данном модуле.

Схемное изображение цепи тягового питания приведено на рисунке В.2а. На рисунке В.2б указана схема подключения оболочки кабельной линии.

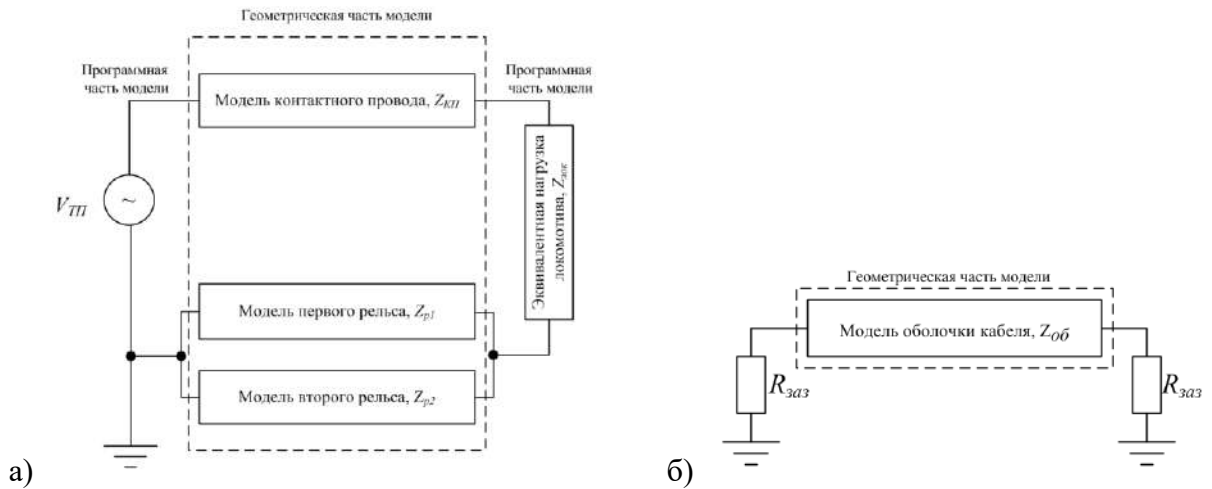


Рисунок В.2 – Моделируемые структурные схемы: а – цепь тягового питания (влияющая); б – подверженная влиянию цепь

В качестве параметров источника на рисунке В.2а выбран переменный ток со стандартным значением напряжения для тяговой подстанции $V_{ТП} = 27,5$ кВ. Элементы $Z_{кп}$, а $Z_{р1}$ и $Z_{р2}$ представляют собой связующие терминальные элементы (External I vs. U) в которых протекающий ток управляется напряжением. Для этих терминалов значения на портах входов и выходов связаны с аналогичными, указанными для соответствующих элементов геометрической схемы в подмодуле «Проводник» модуля «Магнитные поля». Для контактного провода принято обозначение $Z_{кп}$, а $Z_{р1}$ и $Z_{р2}$ для левого и правого рельса. В качестве нагрузки цепи выступает сопротивление $Z_{лок}$ эквивалентное тому, что вызывает электрические потери при прохождении тока по цепям тягового питания локомотива.

При моделировании случая нахождения на участке только одного локомотива сопротивление $Z_{лок}$ выбрано исходя из соображения, что ток, потребляемый одним электроподвижным составом из тяговой сети, равен 140 А. Соответственно для рассматриваемой модели $Z_{лок} = 194,456$ Ом.

На рисунке В.2б аналогичным терминальным элементом $Z_{об}$ (External I vs. U) указана взаимосвязь с оболочкой кабеля, который с обоих концов заземлен, через эквивалентное сопротивление $R_{заз}$. Данное подключение имитирует подключение оболочки кабеля к контуру заземления при вводе его в объекты железнодорожной инфраструктуры. По требованиям к заземляющим контурам оборудования напряжением до 1000 В переменного тока сети с глухозаземленной нейтралью в однофазных сетях напряжением 220 В их сопротивление в любое время года не должно превышать 4 Ом [21]. Соответственно для рассчитываемой модели $R_{заз}$ принят равным 4 Ом. Однако при улучшении контура заземления и соответственно уменьшении значения сопротивления ток, наведенный и стекающий с оболочки кабеля, будет увеличиваться, что с одной стороны повысит эффект экранирования, а с другой, при значительных токах, может привести к возникновению аварийной ситуации от перегрева и воспламенения кабеля.

Граничные условия, рассмотренные в подмодулях и наложенные на геометрическую модель, представленную на рисунке В.1, а также требование замкнутости линий магнитной напряженности, в результате расчетов приведут к искажению электромагнитных полей, в частности уплотнению их в зонах между проводниками и границами модели, что повлияет и на остальное пространство. Устранить данное влияние возможно, если многократно увеличить расчетную область. Однако, так как магнитные влияния электротяговой сети

переменного тока характеризуются незначительным снижением уровня воздействия при увеличении расстояния до нескольких километров, то данный подход не возможен в виду ограниченности вычислительных ресурсов.

Частично скомпенсировать проблему ограниченности расчетной области позволяет дополнительная настройка «Область бесконечных элементов» (Infinite Element Domain). Для этого по краям расчетной области, а именно по ширине и высоте, добавляются небольшие зоны, для модели их размер принят равным по 0,2 м, к которым применяется данная настройка. В результате ее подключения добавочная область при расчете масштабируется с коэффициентом 10^3 , что позволяет уменьшить количество симплексов, снизить искажения в пределах интересующей области с соблюдением граничных условий.

Помимо рассмотренных выше геометрических параметров и настроек следует указать глубину модели. В связи с ограниченностью вычислительных ресурсов отсутствует возможность построить полноценную модель участка железной дороги между двумя станциями. Однако, в первом приближении достаточно выполнить вычисления для небольшой его части с последующим обобщением результатов. Соответственно, для рассматриваемой задачи геометрическая протяженность участка принята равной 2 м. Помимо этого, для всех элементов модели по оси z, отвечающей за протяженность, использованы дополнительные настройки «Системы масштабирования» (Scaling System), которые устанавливают кратность $\times 5$. Также для каждого элемента, описанного подмодулем «Проводник», в настройках симметрии установлено значение для параметра «Коэффициент умножения длины проводника» равным 5. Аналогичная корректировка внесена для визуализации, а именно в настройках камеры (Camera) установлено масштабирование по оси z равным 5.

Таким образом геометрически модель прорисована для 2 м, а в математическом представлении и графическом отображении она эквивалентна участку 10 м. Это позволяет существенно сократить сложность вычислений, увеличив моделируемый участок. Данная процедура стала возможна благодаря предположению, что в пределах рассматриваемого участка все элементы сохраняют свои относительные геометрические положения неизменными. Также это можно применить если относительные положения объектов изменяются равномерно и линейно по всей длине.

Полученная геометрическая модели приведено на рисунке В.3.

Следующим шагом моделирования с применением МКЭ является построение сети конечных элементов. В используемом программном комплексе для выполнения данного шага задаются параметры сетки, а само построение выполняется автоматически с использованием встроенных алгоритмов.

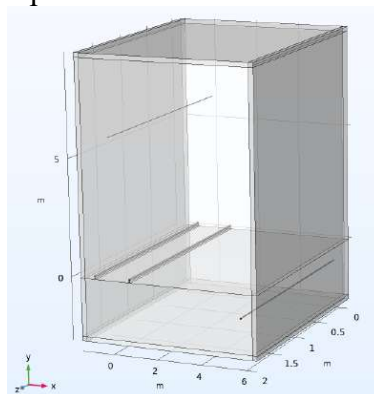


Рисунок В.3 – Визуализация геометрической модели

В качестве параметров сетки выбраны следующие:

- максимальный размер элемента – 1,82 м;
- минимальный размер элемента – 2 мм;
- максимальная скорость увеличения элемента – 1,6;
- коэффициент кривизны – 0,7;
- разрешение узких областей – 0,4.

Помимо данных параметров модель была разделена на две части. В первую вошли элементы, требующие повышенной точности моделирования, это контактный провод, рельсы и оболочка кабеля. Для этой группы выбраны настройки оптимизации для маленьких элементов. Во вторую часть отнесена остальная расчетная область с оптимизацией для больших элементов.

Результат построения сетки представлен на рисунке В.4. Следует отметить, что сетка строится для всего объема, однако, визуально отображаются лишь ребра конечных элементов, располагаемые на внешних границах объектов. Также на рисунке В.4 видно, что размер сетки вблизи и в самих проводящих элементах существенно меньше, чем в свободном пространстве.

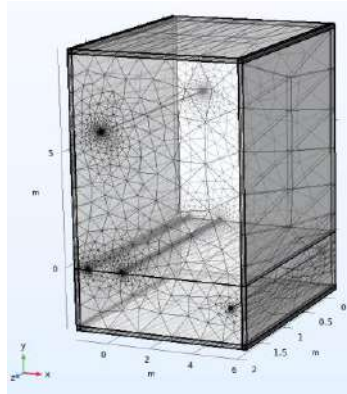


Рисунок В.4 – Сетка конечных элементов

Заключительным этапом подготовки к расчету является подключение и настройка вычислительных модулей. В качестве базового использован модуль вычислений «Частотная область» (Frequency Domain), который используется для вычисления отклика линейной или линеаризованной модели, подвергнутой гармоническому возбуждению для одной или нескольких частот. Расчет произведен на частоте основной гармоники питающей сети – 50 Гц.

Так как в модели использованы подмодули «Проводник», то расчетная часть выполняется после специального шага исследования, в котором определяются направления токов в проводниках. Отвечает за данную задачу модуль «Анализ геометрии проводников» (Coil Geometry Analysis).

Результатом моделирования являются изображения нормализованной плотности магнитного потока, приведенное на рисунке В.5, и электрического поля, приведенного на рисунке В.6, а также численное распределение токов в проводниках модели.

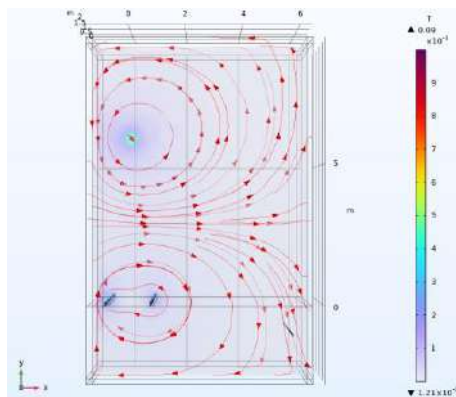


Рисунок В.5 – Нормализованная плотность магнитного потока с линиями напряженности

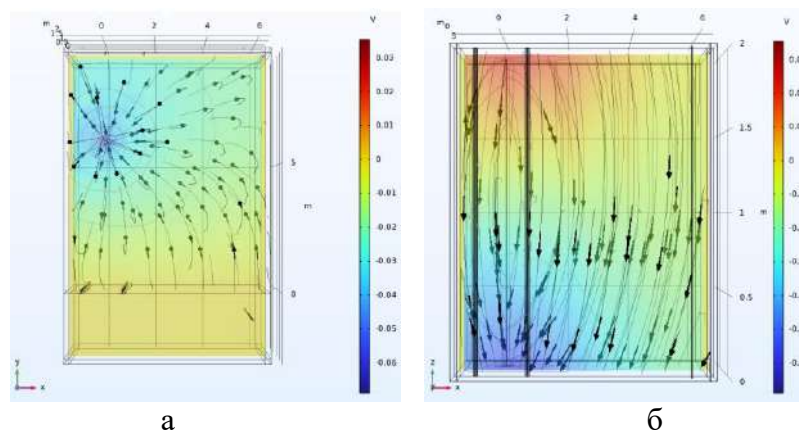


Рисунок В.6 – Электрическое поле с линиями напряженности:
а – главный вид; б – вид сверху

По рисунку В.5 видно, что токи в рельсах направлены в противоположную сторону току в контактном проводе. Их магнитные поля также встречны, что видно по направлению линий напряженности, и частично компенсируют друг друга, снижая наводимое на кабельную линию влияние. При этом основное влияние оказывает магнитное поле, создаваемое рельсами, а не поле от контактного провода. Наличие кабельной линии в свою очередь влияет на распределение токов между рельсами. Также отметим, что земля не является помехой для магнитной составляющей воздействия.

Линии напряженности электрического поля, представленного на рисунке В.6, замыкаются между началом и концом моделируемого контактного провода, а также на землю. Это обусловлено разностью потенциалов между точкой подключения источника питания с одной стороны и нагрузки с другой, вызываемое электрическими потерями в самом проводе. Земля в свою очередь является проводником с нулевым потенциалом. Таким образом влияние электрической составляющей на кабельную линию отсутствует.

Численное распределение токов в проводниках модели представлено в таблице В.1.

Таблица В.1 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы

	Контактный провод	Рельс первый	Рельс второй	Оболочка кабельной линии
Амплитуда тока, А	141,36	81,13	60,23	0,725
Фаза тока, град	-0,94	179,13	178,98	73,99
Частота, Гц	50			

Полученное значение тока в контактном проводе эквивалентно потреблению одиночной «электрички». При этом рассмотрено влияние лишь от одного из всех возможных источников электромагнитных излучений с расчетом лишь для одной влияющей гармоники. Реальный ток при прохождении электроподвижного состава имеет множество гармонических составляющих в широком диапазоне частот, образуемых в результате не идеальности преобразовательной аппаратуры локомотива, искрообразования при движении пантографа по контактному проводу, а также проблем с верхним строением железнодорожного пути. Результат воздействия такого полигармонического спектра складывается по закону суперпозиции и принимает стохастический характер.

Результат моделирования может быть экстраполирован на более протяженный участок, в пределах расстояния между двумя заземлениями смежной линии, исходя из следующих соображений: при увеличении протяженности возрастет наводимое падение напряжения между концами исследуемой линии, но также пропорционально увеличится и сопротивление материала, что в итоге даст аналогичную величину наведенного тока. При наличии дополнительных заземлений наводимый ток будет секционироваться, что снизит

его максимальную величину на отдельных участках между двумя соседними заземлителями.

Для сравнения в работе [64] производится моделирование движения пачки поездов по участку и приводится профиль тока поезда массой 6300 т, приведенный на рисунке В.7. Как видно по рисунку пиковые значения потребляемого тока достигают величин 600 А. Также в [64] выполняется расчет при одновременном движении пачек поездов в обоих направлениях, данный график приведен на рисунке В.8.

В связи с этим произведен пересчет токов по рассматриваемой модели при нагрузке эквивалентной грузовому поезду. Результат представлен в таблице В.2. Наводимые на оболочку кабеля токи также существенно возросли.

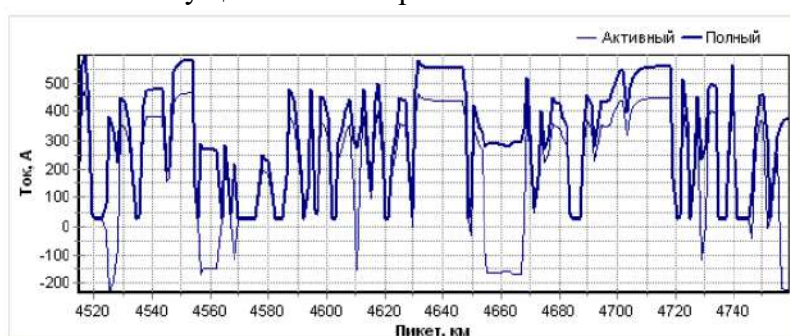


Рисунок В.7 – Профиль тока четного поезда массой 6300 т [64]

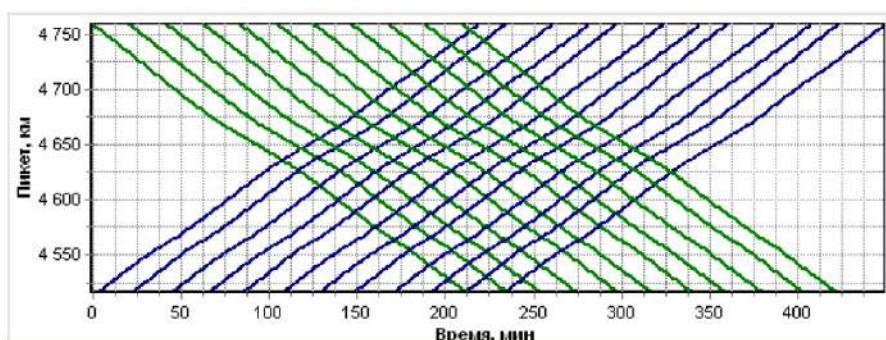


Рисунок В.8 – Расчетный график движения поездов [64]

Таблица В.2 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы для токопотребления грузового поезда

Параметр	Контактный провод	Рельс первый	Рельс второй	Оболочка кабельной линии
Амплитуда тока, А	599,61	344,13	255,48	3,07
Фаза тока, град	-3,97	176,09	175,95	70,96

Из полученных результатов и рисунков В.7, В.8 можно сделать вывод, что наводимый на смежную линию ток имеет стохастический характер и может быть существенно выше полученных результатов в случае, например, прохождения по участку грузового электроподвижного состава или пачки поездов, при одновременном прохождении поездов по участку в обоих направлениях, наложения влияний от множества факторов и других вариантов.

Также значительный интерес представляет исследование методов снижения наводимых влияний. Одним из эффективных методов является изменение схемы питания, например, применение системы питания с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

Используемый программный комплекс позволяет гибко подстраивать модель под исследуемую задачу. Так для перевода модели на систему с ЭУП геометрическая часть была дополнена двумя медными проводниками, расположенными с внешней стороны опоры контактной сети. Усиливающий провод размещен на расстоянии 4,5 м от

контактного провода и на высоте 8 м от головки рельса. Экранирующий подвешен соответственно на расстоянии 3,8 м от контактного провода и на 8,4 м над рельсами.

Схема подключения при этом была изменена следующим образом: усиливающий провод подключен параллельно к контактному, а экранирующий – к рельсам. Полученные распределения полей приведены на рисунке В.9.

Численное распределение токов в проводниках модели с ЭУП для двух вариантов потребляемых токов представлено в таблице В.3.

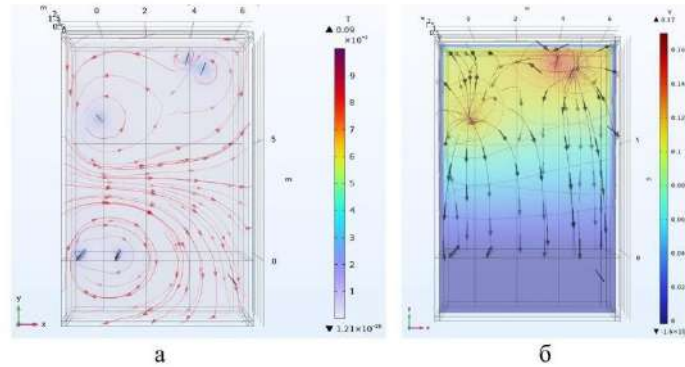


Рисунок В.9 – Распределение полей для модели с системой тягового электроснабжения с экранирующим и усиливающим проводами:
а – магнитное поле; б – электрическое поле

Таблица В.3 – Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы с ЭУП для двух величин питающего тока

Моделируемый проводник	Вариант № 1		Вариант № 2	
	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град
Контактный провод	66,77	-0,603	283,77	-2,174
Рельс первый	52,25	179,21	222,06	177,64
Рельс второй	39,1	179,06	166,19	177,49
Оболочка кабельной линии	0,376	73,59	1,6	72,02
Усиливающий провод	74,62	-0,377	317,17	-1,948
Экранирующий провод	50,05	-179,81	212,71	178,62

Как видно по результатам моделирования перевод тягового питания на систему с ЭУП позволяет получить снижение наводимых на смежную линию токов в 1,92 раза, что согласуется с теоретическими положениями и в свою очередь подтверждает возможность применения МКЭ и предлагаемой модели для исследований в сфере определения наводимых влияний и разработки методов защиты от них.

Однако следует отметить, что математическое моделирование позволяет получить значения, лишь для конкретного модельного примера, имеющего ряд ограничений и допущений. Так данная модель в качестве источника влияний рассматривает лишь систему тягового питания. Реальные наведенные токи, в свою очередь, являются результатом одновременных случайных воздействий от множества источников и естественно будут отличаться от результатов моделирования.

Для детального анализа процессов образования наводимых влияний необходимо осуществить сбор базы статистических данных и, используя стохастический математический аппарат, изучать параметры распределений, выполняя декомпозицию и выявление характеристик и степени влияния отдельных источников. После определения статистических параметров влияющих источников необходимо применение математического моделирования, которое позволит детально исследовать процессы воздействий и разработать соответствующие меры по защите от них.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА

Испытаний по измерению параметров электромагнитного влияния внешних факторов на воздушные и кабельные линии ОТС

1 НАЗНАЧЕНИЕ

Настоящая программа и методика устанавливает объем и методы измерения значений параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии ОТС.

2 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

2.1 Объектом испытаний являются:

а) кабельные линии связи ОТС участков железной дороги подверженные электромагнитному влиянию:

- участков электрифицированной железной дороги оборудованных тяговой сетью переменного тока;
- линий электроснабжения оборудования железной дороги, расположенные на опорах контактной сети или на отдельных опорах расположенных вдоль железной дороги;
- трехфазных линий внешнего электроснабжения.

б) системы заземления, используемые для эксплуатации кабельных линий связи ОТС, на которых проводятся испытания по пункту а).

2.2 Выбор участков, на которых проводятся измерения параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии ОТС, проводится РГУПС, с учетом обеспечения полноты и объема измерений, необходимых для определения этих параметров.

3 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

3.1 Целью испытаний по данной программе и методике является уточнение действующих (возникающих) значений импульсных перенапряжений и импульсов тока возникающих в кабельных линиях связи подверженных электромагнитному влиянию внешних воздействующих факторов.

3.2 Уточнение вышеуказанных действующих (возникающих) значений импульсных перенапряжений необходимо для определения требований к защитным устройствам по снижению воздействия электромагнитных влияний на оконечное оборудование связи в виде импульсных перенапряжений и импульсов тока.

4 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1 На воздушные и кабельные линии ОТС, а через них и на оборудование и приборы ОТС участков электрифицированной железной дороги оборудованных тяговой сетью переменного или постоянного тока оказывают воздействие следующие группы факторов:

- тяговая сеть переменного или постоянного тока;
- линии электроснабжения оборудования железной дороги, расположенные на опорах контактной сети или на отдельных опорах расположенных вдоль железной дороги;
- трехфазные линии внешнего электроснабжения;
- разряды молний.

Данные факторы характеризуются по воздействию на воздушные и кабельные линии ОТС магнитным, электрическим и гальваническим влиянием.

4.2 Магнитное влияние обусловлено прохождением по тяговой сети и линиям электроснабжения переменного электрического тока. Магнитному влиянию подвержены все кабельные линии ОТС.

Электрическое влияние обусловлено наличием в тяговой сети и линиях электроснабжения переменного электрического напряжения. Электрическому влиянию подвержены воздушные линии ОТС, провода которых не имеют металлической оболочки.

Гальваническое влияние обусловлено протеканием в земле токов от воздействия вышеуказанных факторов. Гальваническому влиянию подвержены заземленные металлические оболочки кабельных линий ОТС. Гальваническое влияние следует учитывать также при наличии лишь одного заземления в любой точке цепи.

4.3 Наиболее значительное влияние на кабельные линии ОТС оказывает тяговая сеть переменного тока системы 1X25 кВ, являющаяся полностью несимметричной цепью и характеризующаяся токами в сотни ампер.

Влияние тяговой сети переменного тока системы 2X25 в несколько раз меньше тяговой сети системы 1X25.

Тяговая сеть постоянного тока оказывает влияние на кабельные линии ОТС только из-за пульсаций выпрямленного напряжения.

4.4 Линии электроснабжения оборудования железной дороги, расположенные на опорах контактной сети или на отдельных опорах расположенных вдоль железной дороги, включающие в себя линии систем ДПП и ПР, имеют такое же рабочее напряжение, как и напряжение контактной сети, однако оказывают значительно меньшее магнитное влияние на воздушные и кабельные линии ОТС из-за меньших протекающих токов.

Линии питания автоблокировки и продольного электроснабжения напряжением 6 – 10 кВ, характеризуются существенно меньшим напряжением по сравнению с контактной сетью и симметричной системой напряжений по отношению к земле (в нормальном режиме работы тяговой сети).

Трехфазные линии внешнего электроснабжения имеют большие напряжения и токи, но практически влияние этих линий на кабельные линии ОТС сказывается редко из-за большого расстояния до них и симметричного режима работы.

4.5 Разряды молнии вызывают в кабельных линиях ОТС большие импульсные напряжения и токи.

Перенапряжения, вызываемые грозовыми разрядами, имеют ярко выраженный импульсный характер и по форме волны импульса их подразделяют на следующие виды:

- перенапряжения с длительностью фронта импульса 10 мкс и длительностью периода полуспада 350 мкс (сокращенное обозначение 10/350 мкс);
- перенапряжения с длительностью фронта импульса 8 мкс и длительностью периода полуспада 20 мкс (сокращенное обозначение 8/20 мкс);
- перенапряжения с длительностью фронта импульса 1,2 мкс и длительностью периода полуспада 50 мкс (сокращенное обозначение 1,2/50 мкс).

4.6 Значения грозовых импульсных напряжений по ГОСТ 13109-97г. с вероятностью 90 % не превышают 10кВ в воздушной сети напряжением 0,38 кВ и 6 кВ во внутренней проводке зданий и сооружений. Поэтому значение 10 кВ грозового импульсного напряжения можно принять и для нормирования грозовых импульсных перенапряжений воздушных и кабельных линий сети связи. Это положение по настоящей «Программе и методике» натурными измерениями не проверяется в связи с трудностью обеспечения условий проведения испытаний. Проверка проводится расчетным путем с использованием действующих нормативных документов.

5 УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

5.1 Согласование, при необходимости, с руководством участков железной дороги, на которых проводятся испытания, возможности и времени проведения работ по

измерению значений параметров электромагнитного влияния внешних воздействующих факторов возлагается на РГУПС.

5.2 Опытные объекты, на которых проводятся испытания по измерению параметров электромагнитного влияния внешних факторов на воздушные и кабельные линии ОТС, действующие, поэтому в первую очередь должны выполняться указания руководства участков железной дороги, направленные на недопущение срыва графика движения поездов или нарушение работы функционирующей аппаратуры.

5.3 При проведении испытаний обусловленных данной «Программой и методикой» должны выполняться меры безопасности направленные на сохранение жизни и здоровья обслуживающего персонала объекта на котором проводятся измерения и членов рабочей группы, определяемых РГУПС, проводящей измерения.

5.4 Испытания по измерению действующих значений параметров электромагнитных влияний проводятся в реальных условиях эксплуатации участков с кабельными линиями связи подверженных электромагнитному влиянию внешних факторов.

5.5 Для проведения измерений $U_{псф}$ и $U_{оп}$ выбирается действующий кабель имеющий свободные жилы для организации испытаний.

5.6 Опытный участок желательнее выбрать с односторонним питанием тяговой сети. Допускается выбор участка с двухсторонним питанием, но с возможностью выключения поста секционирования.

5.7 Для измерения $I_{об}$ предусмотреть длительную фиксацию показаний на персональном компьютере или другом регистрирующем приборе с целью выявления затекания тяговых токов по оболочке кабеля.

5.8 Ограничения по климатическим условиям во время проведения испытаний не накладываются. При этом реальные климатические условия во время проведения измерений указываются в протоколах испытаний.

6 ВИДЫ И ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

6.1 Испытания по измерению действующих значений напряжений и токов, возникающих в кабельных линиях связи подверженных электромагнитному влиянию внешних воздействующих факторов, проводятся в следующем объеме:

- проверка значений тяговых токов в тяговой сети в различных режимах ее эксплуатации;
- измерение напряжений $U_{псф}$;
- измерение индуцируемых в оболочке кабеля токов от внешних влияний, $I_{об}$;
- определение опасных напряжений индуцируемых кабельных линиях, $U_{оп}$.

6.2 В ходе проведения испытаний объем и методика измерений могут уточняться по согласованию с ОАО «НИИАС» в рабочем порядке.

7 МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

7.1 Измерение индуцируемого псофометрического напряжения в каналах низкой частоты и значений тока и напряжения, индуцируемого на металлических покровах кабеля, проводится на входе оконечного оборудования связи до защитных устройств (при их наличии).

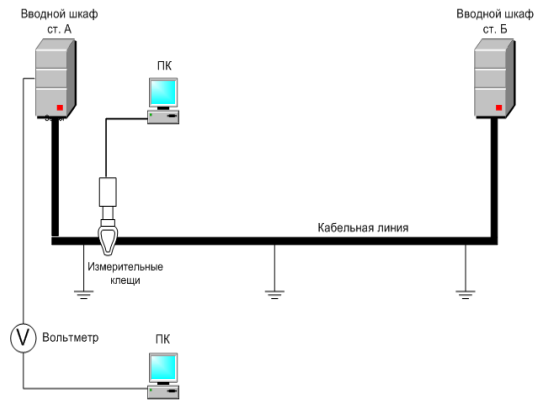


Рисунок 1. Структурная схема организации измерений.

Измерения проводятся для различных значений тягового тока в нормальном и вынужденном режиме работы тяговой сети. При этом предварительно определяется характеристика опытного участка:

- марка кабеля;
- количество заземлений на участке кабельной линии;
- величина сопротивления устройств заземления;
- распределение цепей кабельной линии по назначению;
- система передачи;
- расстояния сближения с источниками внешних влияний;
- характер проявления внешних влияний;
- другие характеристики участка необходимые для определения величин внешних влияний.

7.2 Для вынужденного режима работы тяговой сети измерения проводят по возможности, определяемой РГУПС. При невозможности прямого измерения значений электромагнитного влияния тяговой сети в вынужденном режиме, предполагаемые значения получают расчетным путем с учетом схемы перехода тяговой сети в вынужденный режим и максимальной нагрузки на тяговую сеть.

7.3 В процессе измерений по п. 7.1 уточняется соотношение одновременного влияния тяговой сети и линий электропередачи, результирующее значение которого определяется по методу квадратичного сложения влияний от каждого из источников.

7.4 Контроль уровня тока в тяговой сети, оказывающей влияние на линии связи, осуществляется по показаниям приборов тяговой подстанции. Значения уровня тока в тяговой сети необходимо передавать к месту проведения измерений по средствам связи.

7.5 Расчет электромагнитного влияния на линии связи проводится по методике изложенной в «Правилах защиты устройств связи и проводного вещания от влияния электрифицированных железных дорог переменного тока» или по методике предложенной РГУПС.

7.6 Результаты измерений внешних влияний с указанием необходимых характеристик опытного участка представляются в виде таблиц. Ориентировочная форма таблиц (объем данных в таблице может дополняться и расширяться) представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1. Результаты измерений внешних влияний на кабельную линию на участке ст. Иваново – ст. Петрово Мск. ж.д.

№ п.п.	Хар-ка опытного участка	Величина тока в контактной сети, $I_{кс}$	Величина тока и напряжения в оболочке кабеля от внешних влияний, $I_{об}$.	Псофометрическое напряжение кабельной линии, $U_{псоф.}$, мВ	Опасное напряжение линий передачи, $U_{оп.}$
1					

8 ОТЧЕТНОСТЬ

Результаты испытаний оформляются протоколами и актами в установленном в ОАО «РЖД» порядке.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ПРОТОКОЛ

**измерений параметров электромагнитного влияния
внешних факторов на кабельные линии ОТС
на участках Северо-Кавказской железной дороги**

С.В. Мартиросов

1 зам начальника Ростовской дирекции ЦСС

К.А. Коневец

Нач. отдела эксплуатации Ростовской
дирекции ЦСС

Х.Ш. Кульбикаян

Доцент РГУПС

Ростов-на-Дону

2008

1. Общие положения

Настоящий протокол представляет результаты измерений параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии ОТС.

Испытания проводились на основании ТЗ субподрядного договора 86/1501 от 01 февраля 2008 г.

Испытания проводились согласно программе и методике испытаний по измерению параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии ОТС, далее ПМ (приложение №1).

2. Место и время проведения испытаний

Испытания проводились на сети Северо-Кавказской железной дороги - филиала ОАО «РЖД» на следующих постах ЭЦ:

1 ст. Кизитеринка, участок ст. Кизитеринка – ст. Ростов-Товарная, 4 августа 2008 г.

2 ст. Песчанокопская, участок ст. Песчанокопская – раз. Меклета, 12 августа 2008 г;

3 ст. Подкумок, участок ст. Подкумок – ст. Кисловодск, 18 ноября 2008 г.

3. Объект испытаний

Объектом испытаний являлись кабели в соответствии с таблицей 1.

Краткие сведения об участках и передающих системах, работающих по этим кабелям, приведены на 1 листе в приложении 1 к настоящему протоколу.

Таблица 1

№ участка.	Наименование кабеля	Дата прокладки кабеля
1	МКБКМБ 14x4	1961 г.
2	МКПпАБпШп 7x4x1,05+5x2x0,7+1x0,7	2001 г.
3	МКПпАБпШп 7x4x1,05+5x2x0,7+1x0,7	2006 г.

4. Испытательное оборудование

В процессе испытаний кабелей было использовано испытательное оборудование, указанное в таблице 2.

Таблица 2

№ п.п.	Наименование	Тип	Кол-во	Заводской №
1.	Токовые клещи	АРРА 39Т	1	75500122
2.	Мультиметр цифровой	АРРА-109N	1	73601401
3.	Мультиметр цифровой	АРРА-305	1	74202421
4.	Псофометр	П-323ИШ	1	035694

5. Результаты испытаний

5.1. Результаты измерений параметров электромагнитного влияния, проведенных согласно ПМ приведены в частных протоколах измерений №№ 1-3 на 14 листах.

5.2. Результаты измерений показали, что на участках присутствуют сильные электромагнитные воздействия, вызывающие значительные влияния на кабельные линии ОТС.

6. Выводы и предложения

Необходимо разработать и внедрить мероприятия по защите кабельных линий ОТС Северо-Кавказской железной дороги - филиала ОАО «РЖД» от значительных электромагнитных влияний внешних факторов.

Краткие сведения

- 1 - ст. Кизитеринка, участок ст. Кизитеринка – ст. Ростов-Товарная, 04.08.2008;
- 2 - ст. Песчанокопская, участок ст. Песчанокопская – раз. Меклета, 12.08.2008;
- 3 - ст. Подкумок, участок ст. Подкумок – ст. Кисловодск, 18.11.2008 г.

1. Участок ст. Кизитеринка – ст. Ростов-Товарная, протяженностью 9 км, с двухсторонним питанием. По кабелю работают следующие системы: ЭДС, ПГС, ТУ-ТС, ШЧ-2ССМ, ДЦ, СЦБ, АВ-СВУ (по пер);

2. Участок ст. Песчанокопская – раз. Меклета, протяженностью 14 км, с двухсторонним питанием. По кабелю работают следующие системы: Flex, ДЦ, ОТС, ПГС;

3. Участок ст. Подкумок – ст. Кисловодск, протяженностью 9 км, с односторонним питанием. По кабелю работают следующие системы: Flex, ДЦ, ПГС, МЖС, ЛПС, СЭМ.

Протокол № 1
измерений кабеля МКБКМБ 14х4 по станции Кизитеринка

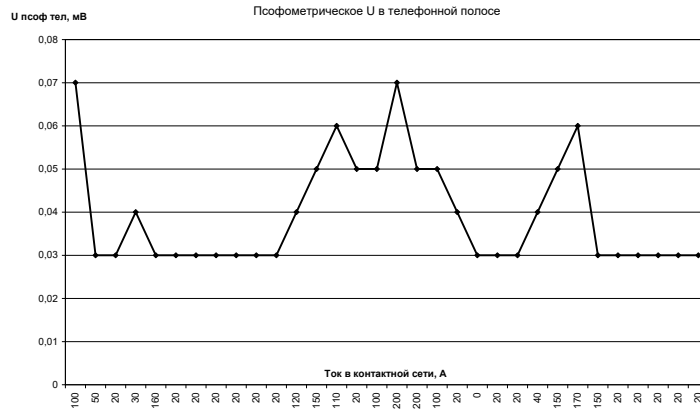


Диаграмма 1 – Психофотрическое напряжение шума в кабеле, измеренное в полосе 0,3 – 3,4 кГц.

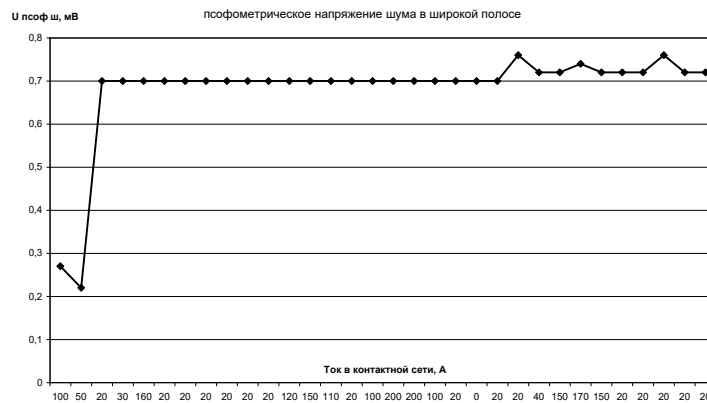


Диаграмма 2 – Психофотрическое напряжение шума в кабеле, измеренное в широкой полосе частот.

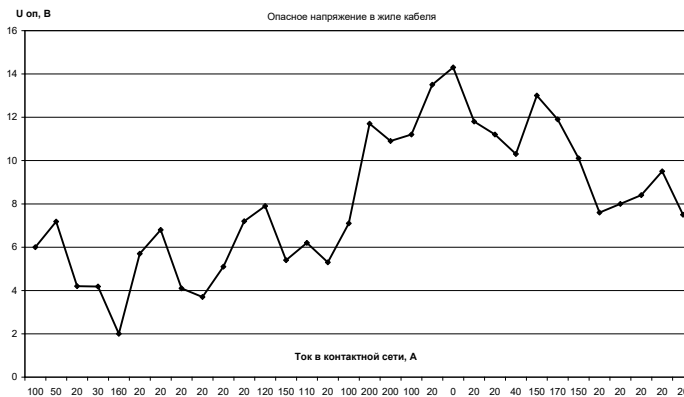


Диаграмма 3 – Опасное напряжение в жиле кабеля

Протокол № 2

измерений кабеля МКПпАБпШп 7х4х1,05+5х2х0,7 по станции Песчанокопская

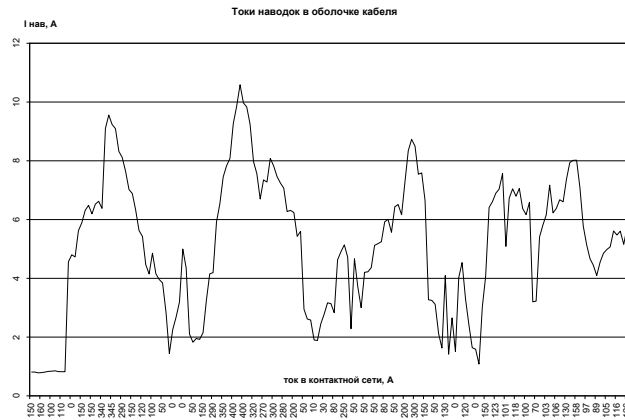


Диаграмма 4 – Токи наводок в оболочке кабеля



Диаграмма 5 – Псофометрическое напряжение шума в кабеле, измеренное в полосе 0,3 – 3,4 кГц.



Диаграмма 6 – Опасное напряжение в жиле кабеля

Протокол № 3
измерений кабеля МКПпАБпШп 7х4х1,05+5х2х0,7 по станции Подкумок

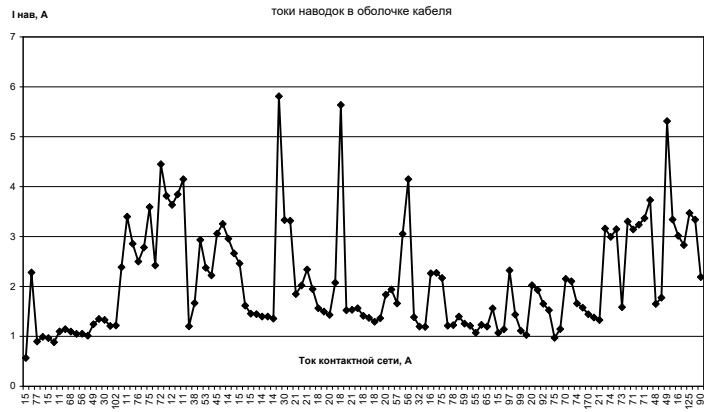


Диаграмма 7 – Токи наводок в оболочке кабеля

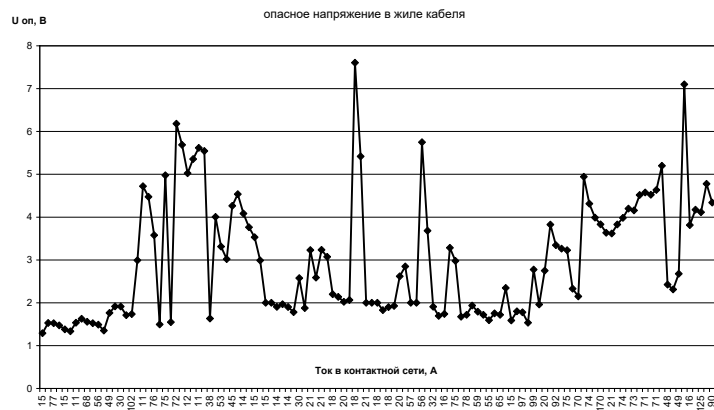


Диаграмма 8 – Опасное напряжение в жиле кабеля

С.Н. Мирошниченко

Ст. электромеханик кабельного хозяйства
Дорожной лаборатории связи

Б.Х. Кульбикаян

Доцент РГУПС

А.В. Шандыбин

Инженер РГУПС

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Патентная документация

Программа для реализации алгоритма оценки плотности вероятности и функции распределения по критерию минимума функционала качества Фрагменты программы ЭВМ

M :=



D:\Измеренные величины.txt

$x_0 := \min(M)$

Минимальное значение

$x_1 := \max(M)$

Максимальное значение

$N := 100$

Количество поддиапазонов

$d := \frac{(x_1 - x_0)}{N - 1}$

Шаг поддиапазона

$x := x_0, x_0 + d .. x_1$

Граничные точки поддиапазонов

$\alpha := 0.1$

Вариативная величина

$\beta := 0.8999$

Вариативная величина

$\gamma := 0.0001$

Вариативная величина

$Fe(x) := \frac{1}{N_3} \cdot \sum_{n=0}^{N_3-1} \text{if}(x - M_n \geq 0, 1, 0)$

Эмпирическая функция распределения
(рис. 1)

$We(x) := \frac{Fe(x+d) - Fe(x)}{d}$

Эмпирическая функция плотности (рис. 2)

$N_2 := 10$

Количество точек приближения

$i := 0, 1 .. N_2 - 1$

Последовательность натуральных чисел

$dx := \frac{(x_1 - x_0)}{N_2}$

Шаг точек приближения

$xc := \left| \begin{array}{l} xc_0 \leftarrow x_0 + \frac{dx}{2} \\ \text{for } i \in 1 .. N_2 - 1 \\ \quad xc_i \leftarrow xc_{i-1} + dx \\ \quad xc \end{array} \right.$

Средние значения поддиапазонов (точки приближения)

$Fe2 := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 .. N_2 - 1 \\ \quad Fe2_i \leftarrow Fe(xc_i) \\ \quad Fe2 \end{array} \right.$

Значения экспериментальной функции распределения в точках приближения

$We2 := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 .. N_2 - 1 \\ \quad We2_i \leftarrow \int_{xc_i - \frac{dx}{2}}^{xc_i + \frac{dx}{2}} We(x) dx \\ \quad We2 \end{array} \right.$

Перераспределение значения плотности
(рис. 3)

$$y := \begin{cases} \text{for } i \in 0..N2 - 1 \\ y_i \leftarrow -\ln(\text{We}2_i) \\ y \end{cases}$$

Начальные значения управляющих воздействий в точках приближения

Поиск оптимальных управляющих воздействий методом Ньютона

Given

$$\alpha \cdot dx \cdot \exp(-y_0) \cdot \left[\sum_{j=0}^{N2-1} \left(\text{Fe}2_j - dx \cdot \sum_{k=0}^j \exp(-y_k) \right) \right] + \beta \cdot (\text{We}2_0 - \exp(-y_0)) \cdot \exp(-y_0) + \gamma \cdot y_0 = 0$$

$$\alpha \cdot dx \cdot \exp(-y_1) \cdot \left[\sum_{j=1}^{N2-1} \left(\text{Fe}2_j - dx \cdot \sum_{k=0}^j \exp(-y_k) \right) \right] + \beta \cdot (\text{We}2_1 - \exp(-y_1)) \cdot \exp(-y_1) + \gamma \cdot y_1 = 0$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\alpha \cdot dx \cdot \exp(-y_9) \cdot \left[\sum_{j=9}^{N2-1} \left(\text{Fe}2_j - dx \cdot \sum_{k=0}^j \exp(-y_k) \right) \right] + \beta \cdot (\text{We}2_9 - \exp(-y_9)) \cdot \exp(-y_9) + \gamma \cdot y_9 = 0$$

$u := \text{Find}(y)$

$$\text{Wr} := \exp(-u)$$

Значения оптимальной плотности распределения в точках приближения (рис. 5)

$$p_i := x_0 + dx \cdot i$$

Дискретная переменная

$$u2(x) := \text{linterp}(p, u, x)$$

Линейная интерполяция данных. Оптимальные управляющие воздействия (рис. 4)

$$\text{Wr1}(x) := \text{linterp}(p, \text{Wr}, x)$$

Линейная интерполяция плотности

$$\text{Wnorm} := \int_{x_0}^{x_1} \text{Wr1}(x) \, dx$$

Нормирующий коэффициент

$$\text{Wr2}(x) := \frac{\text{Wr1}(x)}{\text{Wnorm}}$$

Нормированная оптимальная функция плотности распределения (рис. 7)

$$\text{Fr}(x) := \int_{x_0}^x \text{Wr2}(x) \, dx$$

Оптимальная функция распределения (рис. 6)

Вычисление значения искомого функционала при оптимальных управляющих воздействиях

$$\text{Func} := \alpha \cdot \int_{x_0}^{x_1} (\text{Fe}(x) - \text{Fr}(x))^2 \, dx + \beta \cdot \int_{x_0}^{x_1} (\text{We}(x) - \text{Wr2}(x))^2 \, dx + \gamma \cdot \int_{x_0}^{x_1} (u2(x))^2 \, dx$$

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015660049

«Программа для реализации алгоритма оценки плотности вероятности и функции распределения по критерию минимума функционала качества»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО РГУПС) (RU)**

Авторы: **Шандыбин Алексей Викторович (RU), Таран Владимир Николаевич (RU), Кульбикаян Хачерес Шагенович (RU), Кульбикаян Баграт Хачересович (RU)**

Заявка № 2015614490

Дата поступления 29 мая 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кируйи



ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акты и свидетельства

УТВЕРЖДАЮ

Первый зам. Генерального
Директора ОАО «НИИАС»

Е.Н. Розенберг

_____ 2015 г



об использовании в научных разработках ОАО «НИИАС» результатов
диссертационной работы

ст. преподавателя ФГБОУ ВО «РГУПС» А.В. Шандыбина

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы
Шандыбина А.В.:

- статистическое и аналитическое исследование опасных и мешающих напряжений и наведенных токов в оболочках кабеля на участках СКЖД;
 - исследования реальных коэффициентов защитного действия (КЗД) кабелей АШп и АБШп в диапазоне тональных частот;
 - разработка математической модели (ПО) для расчета на ЭВМ опасных и мешающих напряжений гипотетического участка;
 - прогнозирование опасных напряжений для различных режимов работы контактной сети постоянного и переменного тока;
 - выработка предложений по защите устройств проводной связи ;
- выполнены в работе «Технические предложения по защите устройств проводной связи на основе статистических исследований опасных и мешающих напряжений и наведенных токов в оболочках кабеля связи» (договор № 86/1501 от 01.02.2008г «РГУПС» с ОАО «НИИАС»).

Материалы предложений использованы в проекте № 301248-0-00 «Оборудование объекта связи устройствами защиты на станции Белореченская Северо-Кавказской железной дороги», в котором устройства защиты включены в цепи кабелей марки МКСПАБ 7х4х1,05 участка Армавир – Белореченская с электротягой переменного тока и марки МКПАБ 7х4х1,05 участка Белореченская - Туапсе с электротягой постоянного тока.

Это позволило повысить безопасность эксплуатации и надежность сетей связи.

Ведущий научный сотрудник
отделения телекоммуникаций
и систем передачи данных
ОАО «НИИАС», к.т.н.

А.М. Вериго

Начальник отдела отделения
телекоммуникаций и систем
передачи данных
ОАО «НИИАС», к.т.н.

О.К. Васильев

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Ростовский
государственный университет
путей сообщения»



А.Н. Гуда

«27» 06 2023 г.

Акт

о реализации научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук Шандыбина А.В. в учебном процессе

Настоящим актом подтверждается использование в учебном процессе результатов диссертационной работы Шандыбина А.В., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Результаты диссертационной работы использованы при проведении практических и лабораторных занятий по курсам учебных дисциплин «Электромагнитные поля и волны» и «Математическое моделирование систем и процессов» на кафедре «Связь на железнодорожном транспорте» Ростовского государственного университета путей сообщения, а также при подготовке учебных пособий:

– **Кульбикаян, Х.Ш.** Измерения в технике связи. Учебное пособие / Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян, А.В. Шандыбин; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017 – 331 с.

– **Кульбикаян, Х.Ш.** Эксплуатация технических средств обеспечения движения поездов. Учебное пособие / Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян, А.В. Шандыбин; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017 – 238 с.

– **Кульбикаян, Х.Ш.** Телекоммуникационные сети и технологии. Учебное пособие / Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян, А.В. Дицков, А.В. Шандыбин; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2019 – 211 с.

В учебном процессе использованы:

– метод математического моделирования компонентов транспортного электротехнического комплекса;

– метод статистической оценки плотности вероятности и функции распределения по критерию функционала невязки, алгоритм вычислений и программа, его реализующая;

– метод синтеза импульсной функции устройства компенсации линейных составляющих шумовых сигналов.

Декан факультета ИТУ
к.т.н., доцент

А.М. Лященко

Начальник отдела ДиА
к.т.н., доцент

А.В. Костюков

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГУПС
д.т.н., профессор

А.Н. Гуда

« 31 » 07 2023 г.



УТВЕРЖДАЮ
Зам. генерального директора
ФБУ «Государственный региональный
центр стандартизации, метрологии и
испытаний в Ростовской области»

М.А. Козлов

2023 г.



Акт

апробации результатов научного исследования на соискание ученой степени кандидата наук Шандыбина А.В.

Настоящий акт составлен о том, что научные результаты диссертационного исследования по теме «Повышение работоспособности компонентов системы управления транспортным электротехническим комплексом при внешних электромагнитных воздействиях» прошли апробацию в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Ростовской области».

Была апробирована математическая модель и методика расчёта распределения электромагнитных полей с учётом многофакторного подхода. В результате установлено, что наиболее значимыми являются следующие положения научной новизны:

– показан механизм воздействия системы тягового электроснабжения на кабельную линию управления с учетом граничных условий и структуры железнодорожного пути на основе методов математического моделирования электромагнитных полей;

– предложена система компенсации токов, индуктированных в кабельных линиях управления и обоснованы способы ее применения.

Указанные положения были подвергнуты анализу и испытаниям, которые показали, что предложенные материалы обладают научной новизной и могут быть использованы в транспортной отрасли.

Был апробирован метод математического моделирования, основанный на уравнениях электромагнитного поля, данный метод даёт возможность учета существующих реальных параметров проводимости среды, системы тягового электроснабжения, различных параметров схемы замещения электрической цепи.

Разработанная система компенсации токов выполнена на базе интеллектуального алгоритма статистической обработки данных. Представленные материалы подтверждают эффективность математической модели и предложенной методики расчёта, а также сходимости результатов с экспериментальными данными.

От ФГБОУ ВО РГУПС
Заведующий лабораторией кафедры
«Связь на железнодорожном
транспорте» ФГБОУ ВО РГУПС

А.В. Шандыбин

От ФБУ «Ростовский ЦСМ»
Главный метролог, к.т.н.

С.В. Голосной



Объединенный ученый совет ОАО «РЖД»

СЕРТИФИКАТ

Настоящий сертификат подтверждает, что

Шандыбин Алексей Викторович
РГУПС

*принял участие в XI Всероссийском конкурсе
научных работ среди студентов и аспирантов
по транспортной проблематике
«Проекты инновационного развития железнодорожного
транспорта в условиях импортозамещения и изменения
пространственной конфигурации транспортного рынка»*

в номинации научно-исследовательских проектов

«Инфраструктура»

Научный руководитель: В. Н. Таран

Председатель Объединенного
ученого совета ОАО «РЖД»,
д.э.н., профессор

Б.М. Лapidус

Москва, 2023