

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор
Таран Владимир Николаевич
- Официальные оппоненты:** **Суслов Константин Витальевич,**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»;
- Терёхин Илья Александрович,**
кандидат технических наук, доцент,
проректор по воспитательной работе и связям с производством, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».

Защита диссертации состоится 27 декабря 2023 г. в 13-00 ч на заседании диссертационного совета 40.2.002.11 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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». 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. Ковынец, 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. Розенблум, 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, V. Pishgahzadeh, S. Soleymani, A. Tsaliovich и др.

Цели 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 натурального 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».

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 131 наименование, и 7 приложений. Работа изложена на 139 страницах основного текста, содержит 55 рисунков, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность и степень разработанности темы, определены цели и задачи, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология и методы проведения исследований, приведены основные положения, достоверность и степень апробации результатов.

В первой главе проанализированы современные методы оценки внешних электромагнитных воздействий и методы защиты от них.

В частности, произведенный анализ научных работ выявил необходимость совершенствования систем электромагнитной совместимости компонентов транспортных электротехнических комплексов и электрифицированных железных дорог. С целью определения возможного пути усовершенствования которых произведено исследование современных методов защиты и выполнено моделирование электростатического поля ЛЭП (рисунок 1), электростатического поля, порождаемого грозным облаком, вокруг штыря молниезащиты (рисунок 2) и влияния параметров слоистого грунта на эффективность контура заземления. Направления растекания токов в земле представлены на рисунке 3.

Также в данной главе приведены используемые в диссертации математический аппарат и методы.

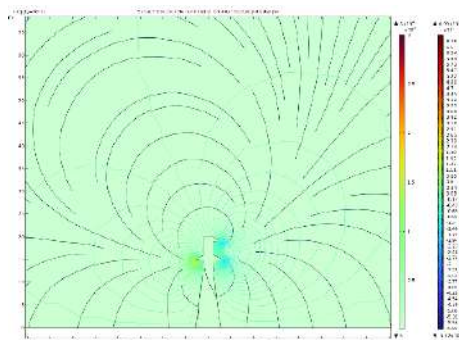


Рисунок 1 – Расчетное электрическое поле ЛЭП 35 кВ

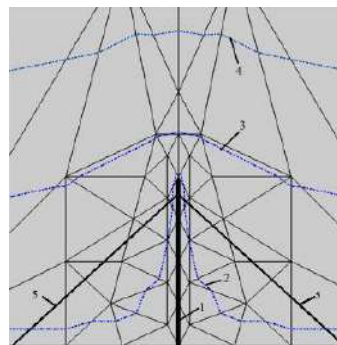


Рисунок 2 – Результат моделирования молниезащиты

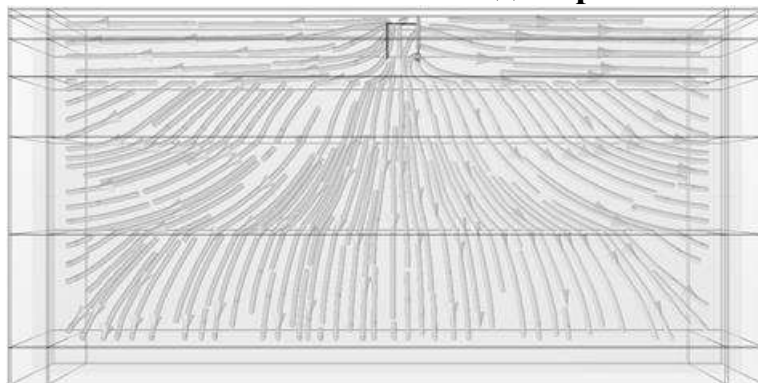


Рисунок 3 – Схема растекания токов в слоистом грунте

В основу диссертационного исследования положен классический математический аппарат, основанный на уравнениях в частных производных, которыми описываются электромагнитные поля, в частности уравнения Максвелла. Используются понятия линейных пространств, системы ортогональных векторов, операторов, функционалов и их производных, а также классические положения теории вероятностей, такие как случайная величина, математическое ожидание, дисперсия, функция распределения, плотность вероятности, корреляционная функция и т.д.

Осуществлена постановка задачи и описаны рамки исследования.

Во второй главе рассматривается применение уравнений Максвелла, Гельмгольца, Пуассона и Лапласа для исследования влияния электромагнитного воздействия на оболочку кабельной линии управления компонентами транспортного электротехнического комплекса. Приведены вычислительные алгоритмы решения уравнений электростатики и магнитостатики методом конечных элементов (МКЭ). Представлены результаты исследования точности разработанных программ, реализующих вычисления уравнений электростатики и магнитостатики на основе МКЭ. Показано, что необходимая точность может быть достигнута за счет повышения детализации моделируемых элементов при разбиении их на сетку конечных элементов (КЭ). При этом предел точности МКЭ определяется вычислительной ошибкой.

Произведено исследование степени электромагнитного воздействия компонентов тяговой сети железной дороги на оболочку кабельной линии управления компонентами электротехнического комплекса. В рамках которого

построен ряд моделей для участка железной дороги. Моделирование осуществлялось с применением специализированной программной оболочки Comsol. Базовая модель включает: основные элементы тяговой сети переменного тока 27,5 кВ в качестве источника влияний (контактный провод и рельсы), исследуемый объект в виде оболочки кабельной линии и окружающую среду (над- и подземную); учитывает: форму, пространственное расположение, материал, электрические и магнитные свойства элементов и окружающей среды, а также соответствующие граничные и начальные условия. Расчет производился на основной гармонике питающего тока 50 Гц в стационарном режиме.

Основные модельные уравнения представлены системой:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} - \nabla V; \\ \nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} + j\omega\mathbf{D} + \mathbf{J}_e; \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля; $j = \sqrt{-1}$; ω – частота; \mathbf{A} – векторный потенциал; ∇ – оператор Гамильтона; V – скалярный потенциал; \mathbf{H} – напряженность магнитного поля; σ – проводимость; \mathbf{D} – электрическая индукция; \mathbf{J}_e – внешний источник плотности тока; \mathbf{B} – магнитная индукция.

Система (1) дополняется материальными уравнениями.

Граничные условия задаются рядом уравнений, основные из них:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

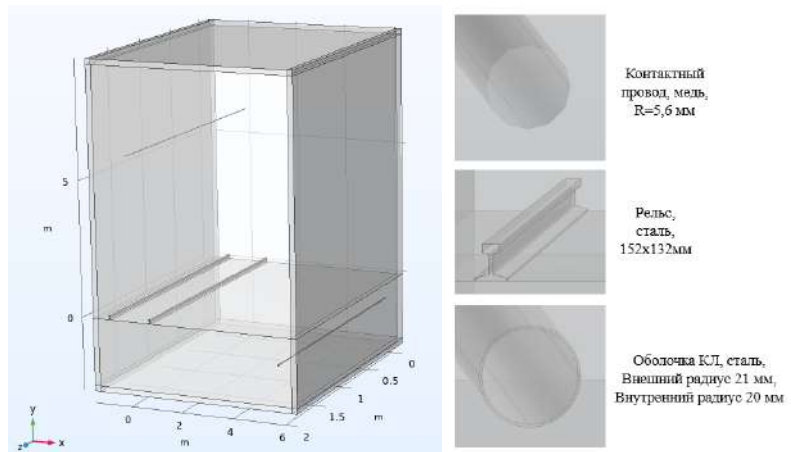
где \mathbf{n} – вектор нормали к граничной поверхности.

Система (2) дополняется уравнениями, описывающими условия для векторов поверхностных токов и тангенциального электрического поля на внутренних границах сред, условием с нулевым потенциалом для границ подземной части и т.д.

Геометрическое представление модели приведено на рисунке 4. Визуализация данной модели показана на рисунке 5. Наложение сетки КЭ – рисунок 6. Как видно, использована адаптивная сетка для оптимизации соотношения точность/сложность вычислений.



**Рисунок 4 –
Геометрическое
представление модели**



**Рисунок 5 – Визуализация геометрической
модели**

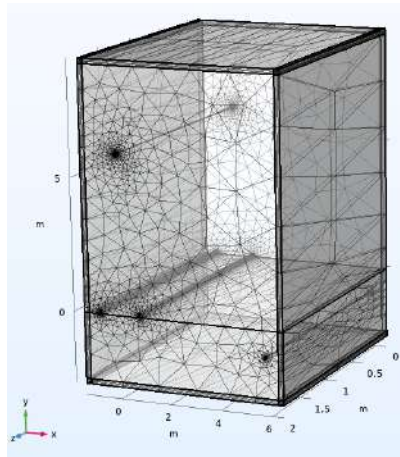


Рисунок 6 – Сетка конечных элементов

Результаты моделирования представлены графически в виде плотности магнитного потока (рисунок 7) и электрического поля (рисунок 8 – главный вид, рисунок 9 – вид сверху). Стрелками на рисунках указаны направления линий напряженности. Помимо графического представления результатом расчетов являются значения токов, протекающих во всех элементах модели.

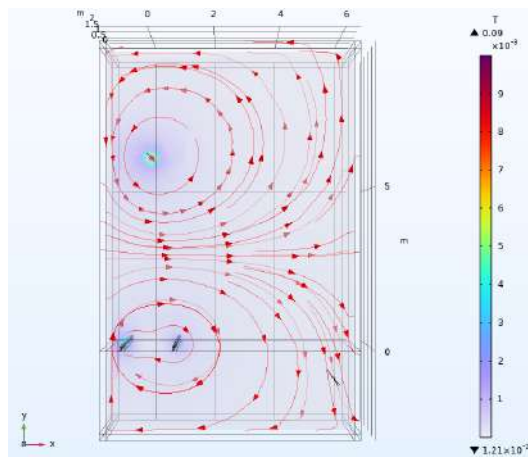


Рисунок 7 – Нормализованная плотность магнитного потока с линиями напряженности

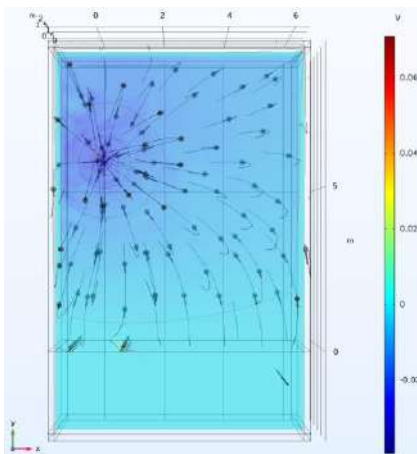


Рисунок 8 – Электрическое поле с линиями напряженности (главный вид)

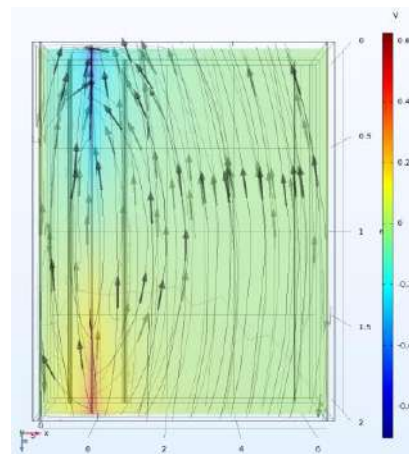


Рисунок 9 – Электрическое поле с линиями напряженности (вид сверху)

Проверка эффективности модели выполнена для различных по значению тяговых токов. В частности, в диссертации представлены результаты для токов, эквивалентных по уровню потребления, как пассажирским, так и грузовым составом. Также по аналогичной модели выполнен расчет влияния от тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

Результаты перевода модели на систему с ЭУП, с точки зрения снижения степени воздействия на кабельную линию, соответствуют теоретическим положениям для данной тяговой сети.

Для повышения степени приближения исследуемого объекта к реальному выполнена модель с учетом балластного слоя и слоистости земли. Используемые слои окружающей среды представлены на рисунке 10, результаты моделирования магнитного потока на рисунке 11, а электрического поля на рисунке 12.

Слой окружающей среды

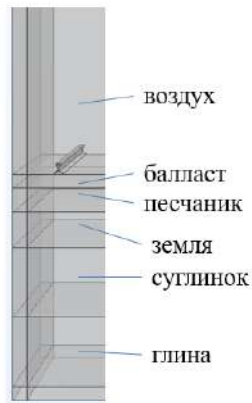


Рисунок 10 – Слой окружающей среды, учитываемые в модели

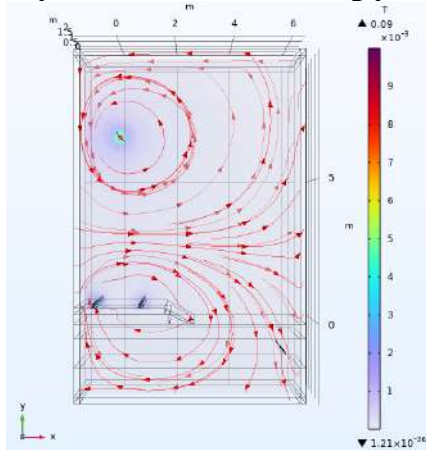


Рисунок 11 – Нормализованная плотность магнитного потока с линиями напряженности

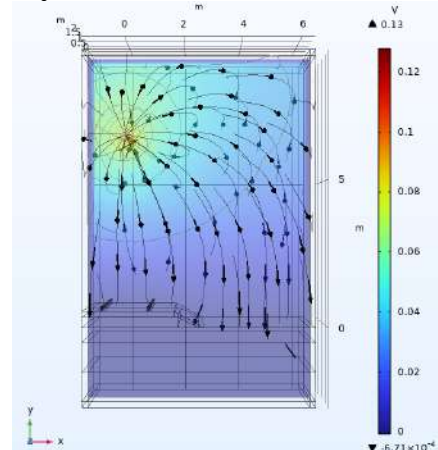


Рисунок 12 – Электрическое поле с линиями напряженности

Помимо математической модели в данной главе представлены результаты экспериментальной оценки параметров электромагнитного влияния на кабельные линии, произведенные в рамках договора «РГУПС» с ОАО «НИИАС» № 86/1501: «Технические предложения по защите устройств

проводной связи на основе статистических исследований опасных и мешающих напряжений и наведенных токов в оболочках кабеля связи». Значения токов, наведенных на оболочку кабеля, измеренные на вводе кабельной линии в пост ЭЦ ст. Подкумок, представлены на рисунке 13.

Ток, наведенный на оболочку кабеля

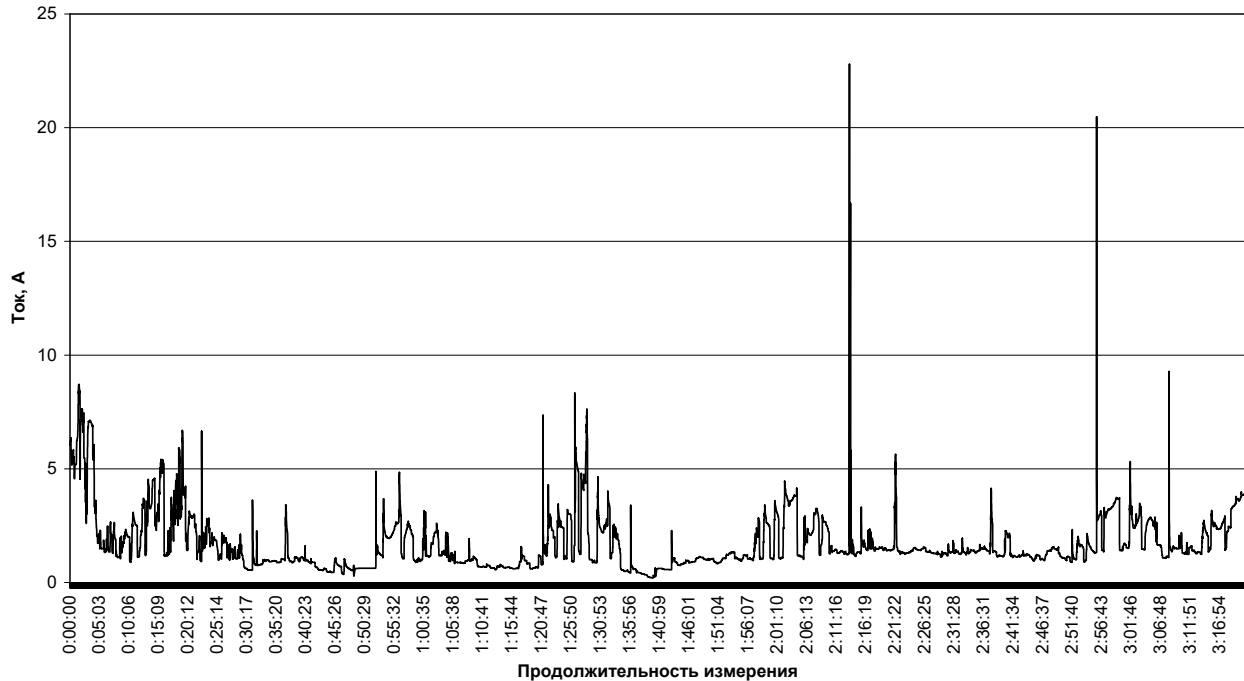


Рисунок 13 – Экспериментально измеренные токи, индуктированные в оболочке кабельной линии

В результате сопоставления модельных и экспериментальных данных сделан вывод, что значения, полученные в результате моделирования, не противоречат измеренным уровням, следовательно, разработанная модель участка железной дороги может быть использована для оценки электромагнитных воздействий, анализа и разработки мер по повышению работоспособности компонентов системы управления транспортным электротехническим комплексом.

В третьей главе рассматривается важность системы синхронизации для обеспечения работоспособности современных цифровых систем, входящих в состав устройств управления электротехническими комплексами. Показаны причинно-следственные связи возникновения сбоев в системе синхронизации при увеличении уровней внешних электромагнитных воздействий. Для повышения устойчивости синхронизации к наведенным помехам в цифровых устройствах управления электротехническими комплексами предложено использовать явление самоорганизации, подтвержденное натурными экспериментальными исследованиями.

В ходе экспериментов исследовалась стабильность частоты колебания двух (рисунок 14) и трех (рисунок 15) взаимно синхронизированных генераторов.

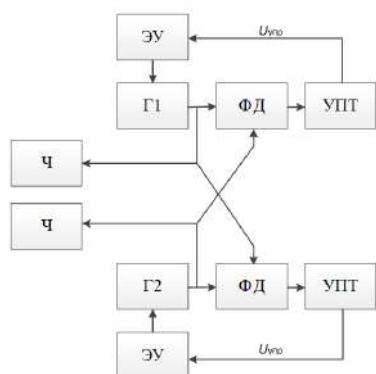


Рисунок 14 – Схема взаимной синхронизации двух генераторов

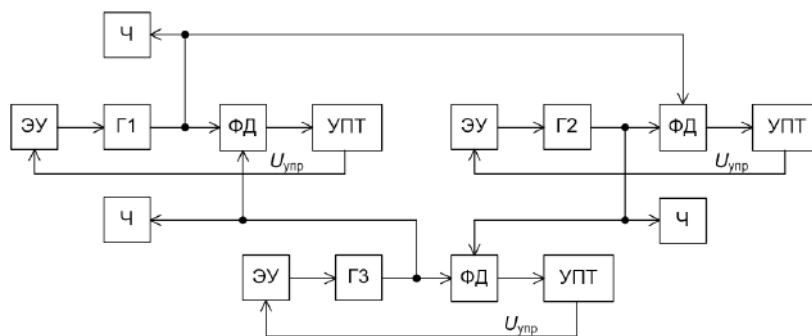


Рисунок 15 – Схема взаимной синхронизации трех генераторов

На рисунках 14 и 15 под Г1, Г2, Г3 обозначены исследуемые генераторы, которые вводятся в синхронизм с помощью индивидуальной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). ФАПЧ состоит из фазового детектора (ФД), усилителя постоянного тока (УПТ) и элементов управления (ЭУ), входящих в состав колебательного контура генератора и изменяющих его резонансную частоту. Также использованы частотомеры (Ч) для контроля частоты генерации.

В качестве критерия оценки использовалось среднеквадратическое отклонение. Результаты приведены на рисунке 16.

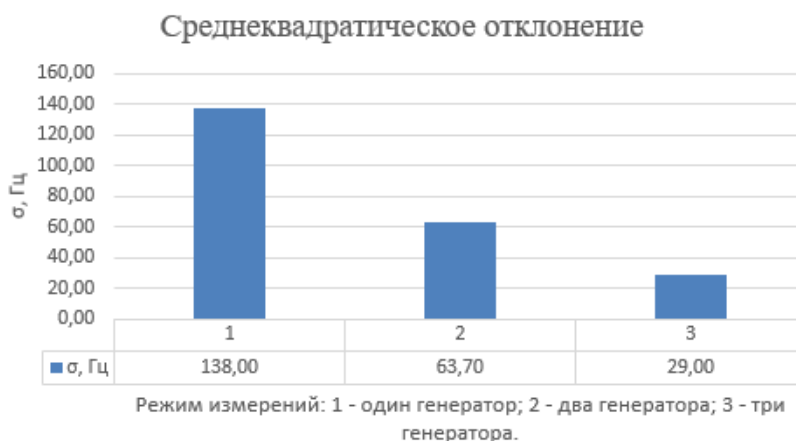


Рисунок 16 – Среднеквадратическое отклонение от среднего значения частоты генерации

Стабильность частоты взаимно синхронизируемых генераторов оказывается выше стабильности одного генератора и увеличивается по мере увеличения числа синхронизируемых генераторов.

Проведенные экспериментальные исследования являются прямым подтверждением наличия явления самоорганизации в системе связанных генераторов и подтверждают возможность применения кластера взаимосвязанных генераторов для повышения устойчивости синхронизации к

наведенным помехам в цифровых устройствах управления электротехническими комплексами, равно как и общей работоспособности.

В четвертой главе для решения поставленных в диссертационном исследовании задач выполнен синтез устройства для повышения работоспособности компонентов системы управления электротехническим комплексом. Приведен возможный алгоритм выбора систем защиты на основе экономических критериев. Произведена статистическая обработка результатов измерений, описанных во второй главе. Для устранения недостатков традиционных подходов статистической обработки, разработан метод непараметрического определения законов распределения на основе минимума функционала невязки. При этом производится согласованная оценка искомых параметров. В качестве исходного выбран функционал:

$$\Phi[F(x), \dot{F}(x)] = \alpha \int_{x_0}^{x_1} (F_e(x) - F(x))^2 dx + \beta \int_{x_0}^{x_1} (W_e(x) - \dot{F}(x))^2 dx + \gamma \int_{x_0}^{x_1} (u(x))^2 dx, \quad (3)$$

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, где точкой обозначена производная по x ; $u(x)$ – регуляризирующее воздействие; $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\gamma > 0$ – весовые коэффициенты.

Взаимосвязь между искомыми функциями в (3) производится с применением регуляризирующей функции $u(x)$, взятой по Тихонову.

Для задачи определены граничные условия:

$$F(x_0) = 0; F(x_1) = 1, \quad (4)$$

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

Так же учтены физические ограничения для плотности вероятности:

$$\int_{x_0}^{x_1} \dot{F}(\tau) d\tau = 1, \quad (5)$$

для любых токов $\dot{F} \geq 0$.

Дифференциальное уравнение Эйлера-Лагранжа, решение которого дает экстремум искомого функционала (3) имеет вид:

$$\frac{\partial L}{\partial F} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{F}} \right) = 0, \quad (6)$$

где $L = \alpha (F_e(x) - F(x))^2 + \beta (W_e(x) - \dot{F}(x))^2 + \gamma (u(x))^2$.

На рисунке 17 представлено сравнение расчетных и эмпирических функций распределения, а на рисунке 18 – функций плотности распределения.

Приведенный алгоритм апробирован и опубликован [5]. На основе получаемых по данному методу результатов предлагается определять моменты срабатывания системы защиты.

Система компенсации наводимых токов представляет собой устройство, осуществляющее измерение наводимых на кабельную оболочку внешних электромагнитных воздействий, анализирующее их и, в случае превышения установленного порогового значения, генерирующее компенсирующее

воздействие, которое передается в защищаемую оболочку для снижения уровня наведенного влияния до безопасных значений.

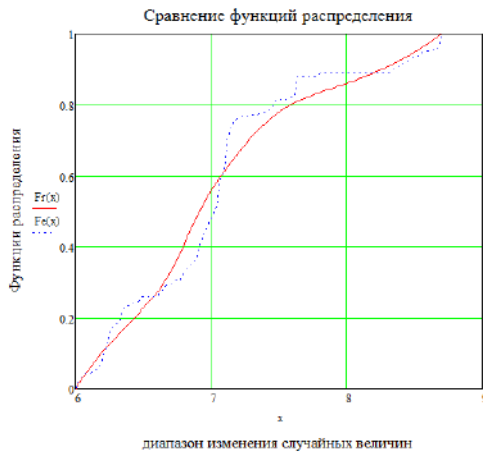


Рисунок 17 – Сравнение расчетных и эмпирических функций распределения

Рисунок 18 – Сравнение расчетных и эмпирических функций плотности распределения

При этом остаточное значение влияний можно рассматривать как погрешность компенсации, оценить величину которого позволяет функция математического ожидания ошибки:

$$M[\xi(t)^2] = M[(\Theta(t) - \eta_1(t) - \eta_2(t) - \dots - \eta_n(t))^2], \quad (7)$$

где $\xi(t)$ – погрешность компенсации; $\Theta(t)$ – измеренное наведенное внешнее электромагнитное воздействие; $\eta_i(t)$ – i -я составляющая компенсирующего тока.

В качестве $\eta_i(t)$ рассматриваются отдельные гармоники тока, сложные полигармонические сигналы или даже составляющие токов более высоких порядков. Например, ток компенсации линейных составляющих наведенного воздействия может быть представлен выражением:

$$\eta_1(t) = \int_0^t h_1(t - \tau)\Theta(\tau)d\tau, \quad (8)$$

где $h_1(t - \tau)$ – импульсная функция компенсирующего устройства для линейных составляющих.

Синтез устройства компенсации подразумевает, что должна быть найдена импульсная функция, которая даст минимизацию погрешности компенсации. Таким образом подставив уравнение (8) в (7), исключив остальные составляющие, произведя ряд преобразований, определив функциональную производную $\left. \frac{\delta M[\xi(t)^2]}{\delta h_1(t - \tau)} \right|_{t - \tau = t_\varepsilon}$ и приравняв ее к нулю можно

получить выражение

$$\int_{t-T}^t h_1(t_\varepsilon)K_\Theta(\tau, t - t_\varepsilon)d\tau = K_\Theta(t, t - t_\varepsilon), \quad (9)$$

из которого, зная автокорреляционную функцию K_Θ , получаем искомую импульсную функцию. Определить автокорреляционную функцию, например, возможно применив преобразование Фурье к спектральной плотности наведенных токов. Однако, ввиду бесконечности количества переменных аргумента в (9) было найдено приближенное решение автокорреляционной и импульсной функций с применением аппроксимирующих В-сплайн функций.

Таким образом упрощенная структурная схема системы компенсации для линейных составляющих наведенного тока показана на рисунке 19. Пример полученной импульсной характеристики для данной системы представлен на рисунке 20.

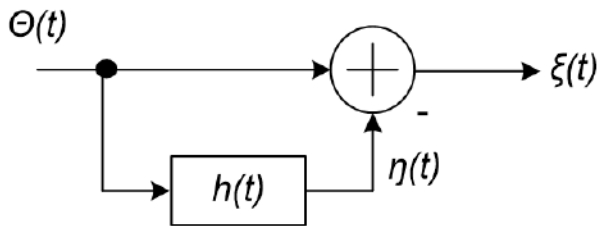


Рисунок 19 – Упрощенная структурная схема системы компенсации для линейных составляющих наведенного тока



Рисунок 20 – Экспериментальная импульсная функция

Аналогичным образом определяются импульсные функции для одновременной компенсации линейных и квадратичных составляющих. Для этого (7) и (8) дополняются соответствующим выражением для квадратичного ядра системы h_2 :

$$\eta_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(t - \tau_1, t - \tau_2) \Theta(\tau_1) \Theta(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \quad (10)$$

В данном случае преобразования дополнительно требуют определения функциональной производной второго порядка по импульсной функции квадратичной составляющей. В результате преобразований получена система интегральных алгебраических уравнений аналогичная (9):

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_3, t - \tau_4) h_1(\tau_3) d\tau_3 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) \times \rightarrow \\ \rightarrow \times h_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 = K_\Theta(t, t - \tau); \\ \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau, t - \tau_1, t - \tau_2) h_1(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_\Theta(t - \tau_5, t - \tau_6, t - \tau_7, t - \tau_8) \times \rightarrow \\ \rightarrow \times h_2(\tau_5, \tau_6) d\tau_5 d\tau_6 = K_\Theta(t, t - \tau_1, t - \tau_2), \end{array} \right. \quad (11)$$

решение которой позволяет найти искомые функции h_1 и h_2 и синтезировать устройство компенсации линейной и квадратичной составляющей.

В процессе функционирования, системе компенсации необходимо выполнять сбор и периодическую обработку статистической информации по токам для определения корреляционных функций и последующей корректировке импульсных функций. Это позволит системе адаптироваться к изменяющимся условиям внешних электромагнитных воздействий. Одновременно с этим, производимая корректировка функции распределения и плотности распределения, получаемых по предложенной методике, будет обеспечивать оптимизацию моментов срабатывания системы компенсации.

С целью подтверждения реализуемости предлагаемой системы произведены проверки на математических моделях. Для осуществления компенсации необходимо осуществить согласование трех основных параметров наведенного и компенсирующего воздействия: амплитуда, фаза и частота.

Так как устройство предполагается использовать для работы на заранее определенных наиболее значимых частотах, например, на частоте основной гармоники питающего напряжения, то условие совпадения частоты можно считать выполненным. Таким образом для подтверждения возможности компенсации по амплитуде была построена модель с условием априорного совпадения фаз, а точнее противофаз сигналов. Данный расчет производился для одной гармоники. Результат моделирования представлен на рисунке 21, по которому видно, что при превышении наведенным влиянием (пунктирная линия) определенного порога происходит срабатывание системы компенсации. Результат компенсации обозначен непрерывной линией. Также построена модель и выполнена проверка компенсации при «совпадении» фаз с условием исходного равенства амплитуд токов. Определенная зависимость энергии результирующего наведенного влияния от разности фаз представлена на рисунке 22.

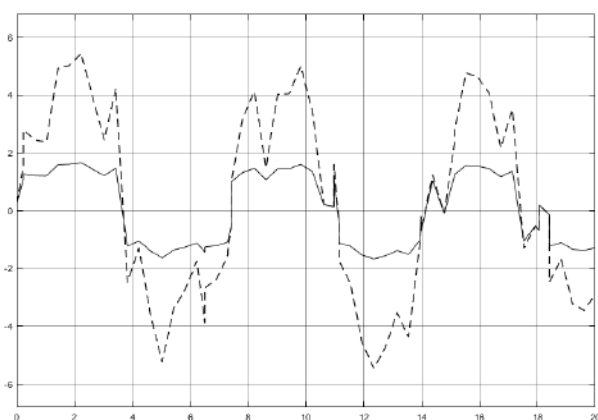


Рисунок 21 – Результат моделирования процесса компенсации по амплитуде

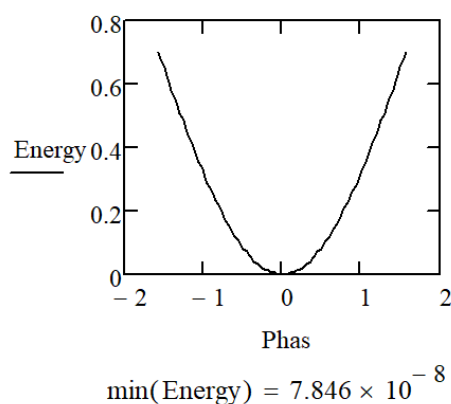


Рисунок 22 – Зависимость энергии результирующего наведенного влияния от разности фаз

На основании проведенных диссертационных исследований и полученных результатов предлагается комплексный подход к повышению работоспособности компонентов электротехнических комплексов. Такая комплексная система

гармонично сочетает в себе хорошо известные существующие пассивные устройства защиты систем управления, дополненные системой компенсации при поддержке кластера самоорганизующихся генераторов.

Алгоритм работы комплексной системы состоит из трех этапов.

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

На втором этапе подключается система защиты, которая снижает уровень наводимых влияний до допустимых значений, что уменьшает вероятности аварий, повышает работоспособность и надежность систем синхронизации. Компенсация производится до тех пор, пока уровни внешних наводимых влияний вновь не снизятся до приемлемых значений. Алгоритм работы системы компенсации наводимых токов приведен на рисунке 23.

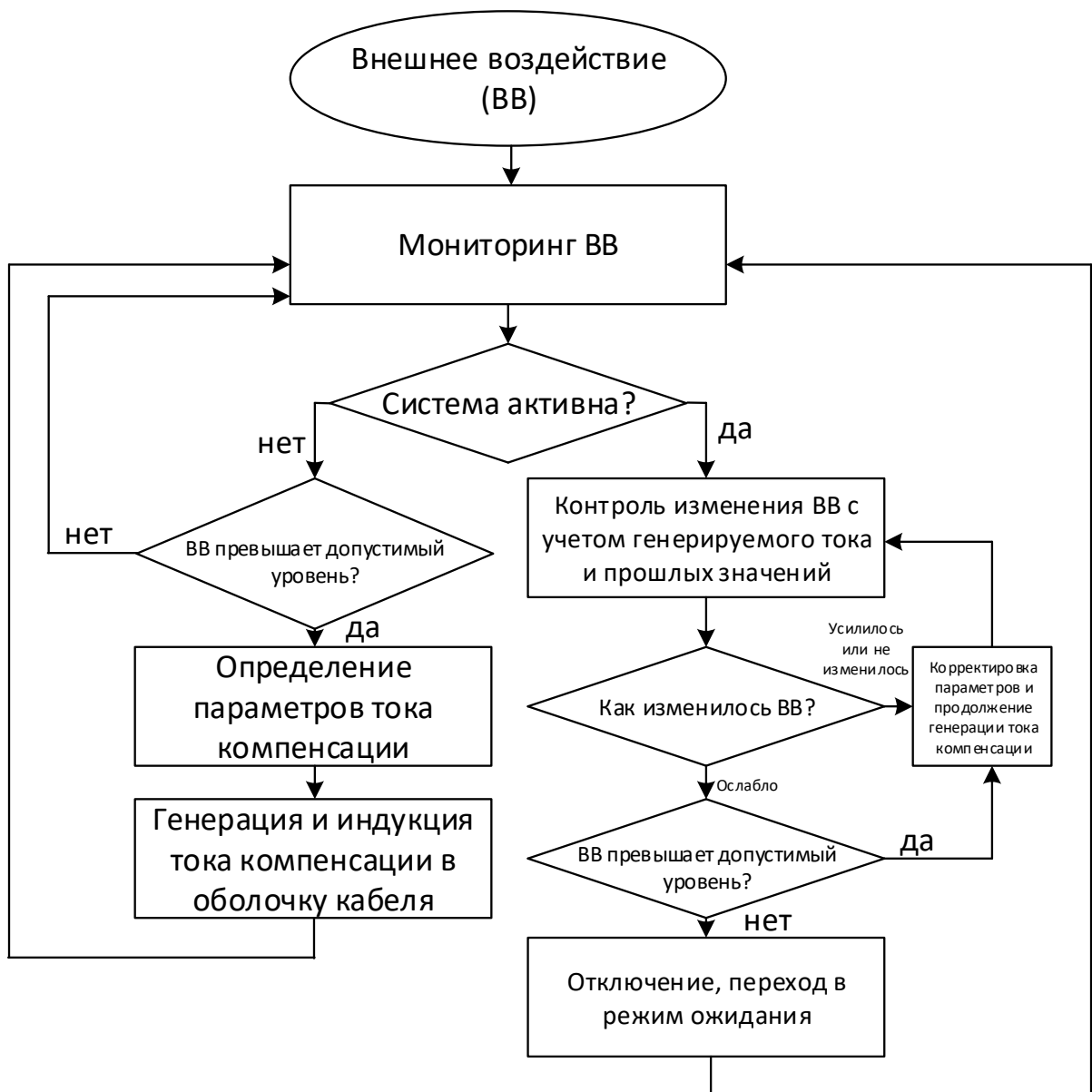


Рисунок 23 – Алгоритм работы системы компенсации наводимых токов

На третьем этапе, в случае произошедшего сбоя системы синхронизации, дополнительно, осуществляется поддержание внутренней частоты кластером самоорганизующихся генераторов, что повышает синхростабильность каналов и систем управления и повышает скорость возвращения в синхронный режим, что в свою очередь повышает работоспособность компонентов системы управления электротехническим комплексом.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, утвержденный ВАК по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

1 Таран, В.Н. Точность численных методов анализа электростатических полей / В.Н. Таран, М.В. Шевлюгин, А.В. Шандыбин // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 59–70. doi: 10.17816/transsyst20217159-70;

2 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;

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования SCOPUS

3 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”(ITI’18) Vol. 1 3. – Springer International Publishing, – 2019. – P. 390-400. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01818-4_39;

4 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. – P. 725-729. doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537402.;

в) зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

5 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. - 21.09.2015 г.;

г) в других рецензируемых научных изданиях

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

7 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 (РГУПС). – 2014. – № 4 (56). – С. 70–75;

8 Оценка плотности вероятности наведенных токов в оболочках кабельных сетей связи / А.В. Шандыбин, Х.Ш. Кульбикаян, В.Н. Таран, Б.Х. Кульбикаян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). – 2015. – № 4 (60). – С. 41–48;

9 Шандыбин, А.В. Метод активной компенсации наведенных токов / А.В. Шандыбин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 109–119;

д) в других научных изданиях и материалах конференций

10 Кульбикаян, Х.Ш. Основы расчета опасных и мешающих влияний электротяги постоянного и переменного тока на аппаратуру проводной связи / Х.Ш. Кульбикаян, Л.А. Зайцева, А.В. Шандыбин // Транспорт-2008. труды всероссийской научно-практической конференции. В 3-х частях. МПС РФ, Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2008. – С. 85-88;

11 Кульбикаян, Х.Ш. Методика повышения точности расчета влияния контактной сети на линии связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт-2009. Труды Всероссийской научно-практической конференции, посвященные 80-летию РГУПС: в 3-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2009. – С. 93-94;

12 Кульбикаян, Х.Ш. Расчетные модели влияния тяговых сетей на линии связи и схемы их замещения / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт-2009. Труды Всероссийской научно-практической конференции, посвященные 80-летию РГУПС: в 3-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2009. – С. 95-96;

13 Кульбикаян, Х.Ш. Перспективные методики расчета электромагнитного влияния тяговых сетей электрифицированных железных дорог на линии связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство. Труды международной научно-практической конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2009. – С. 325-327;

14 Кульбикаян, Х.Ш. Исследование влияния тяговой сети переменного тока на линейно-кабельные сооружения на основе моделирования / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт-2010. Труды Всероссийской научно-практической конференции: в 3-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2010. – С. 63-64;

15 Кульбикаян, Х.Ш. Моделирование влияния тяговой сети переменного тока на кабельные линии связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Телекоммуникационные, информационные и логистические технологии на транспорте. Сборник докладов. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2010. – С. 187-190;

16 Кульбикаян, Х.Ш. Повышение эффективности функционирования кабельных направляющих линий в условиях железнодорожного транспорта / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт-2011. Труды Всероссийской

научно-практической конференции. В 3-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2011. – С. 69-71;

17 Кульбикаян, Х.Ш. Влияние профиля заземлений кабельных направляющих линий на эффективность их функционирования в условиях аварийной работы железнодорожного транспорта / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт-2012. Труды Всероссийской научно-практической конференции. В 3-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2012. – С. 112-114;

18 Шандыбин, А.В. Статистическая оценка наведенных токов на кабельные линии связи / А.В. Шандыбин // Труды международной научно-практической конференции "Транспорт-2013". Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2013. – С. 99-101;

19 Кульбикаян, Х.Ш. Метод компенсации наводок в оболочках электрических кабелей связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Труды Международной научно-практической конференции "Транспорт-2014". В 4-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2014. – С. 70-71;

20 Кульбикаян, Х.Ш. Непараметрическая оценка плотности распределения наведенных токов / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Труды Международной научно-практической конференции "Транспорт-2014". В 4-х частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2014. – С. 72-73;

21 Кульбикаян, Х.Ш. Статистическая обработка наведенных токов в оболочках кабельных сетей связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт-2015. Труды международной научно-практической конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2015. – С. 79-81;

22 Кульбикаян, Х.Ш. Непараметрический метод оценки результатов измерений наводок на кабели связи / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Труды международной научно-практической конференции "Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России". В 3 частях. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2015. – С. 106-108;

23 Кульбикаян, Х.Ш. Активная компенсация наведенных токов в устройствах ЖАТС / Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Транспорт: наука, образование, производство. труды международной научно-практической конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2016. – С. 163-166;

24 Таран, В.Н. Метод подавления электромагнитных полей в трубопроводных транспортных системах / В.Н. Таран, Х.Ш. Кульбикаян, А.В. Шандыбин // Современное развитие науки и техники. Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2017. – С. 116-118;

25 Шандыбин, А.В. Метод компенсации гармонических наводок в устройствах автоматики, телемеханики и связи / А.В. Шандыбин, В.Н. Таран, Х.Ш. Кульбикаян // Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство". Сборник трудов Международной научно-практической

конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2018. – С. 233-236;

26 Taran, V.N. Volterra and Wiener series approach in identification of black box / V.N. Taran, A.V. Shandybin, A.N. Sukhomlinov // Current trends in the development and prospects for the introduction of innovative technologies in engineering, education and the economy. – 2019. – Т. 5. № 1 (4). – pp. 47-52;

27 Таран, В.Н. Электромагнитная совместимость в электротехнических комплексах / В.Н. Таран, А.В. Шандыбин // Сборник научных трудов "Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России" ("ТрансПромЭк-2019"). труды Международной научно-практической конференции, 90-летию Ростовского государственного университета путей сообщения посвящается. – 2019. – С. 73-76;

28 Таран, В.Н. Расчет электрических полей электротехнических комплексов методом конечных элементов / В.Н. Таран, А.В. Шандыбин // Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство". Труды Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 147-151;

29 Таран, В.Н. Анализ электромагнитных влияний на электротехнические комплексы транспортного назначения методом конечных элементов / В.Н. Таран, А.В. Шандыбин // Транспорт: наука, образование, производство. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону. – 2021. – С. 180-184;

30 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;

31 Шандыбин, А.В. Влияние магнитного поля тяговой сети на смежные кабельные линии / А.В. Шандыбин // Актуальные проблемы науки и техники. 2022. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Отв. редактор Н.А. Шевченко. Ростов-на-Дону. – 2022. – С. 648-649;

32 Шандыбин, А.В. Оценка уровней влияния промышленного электромагнитного поля / А.В. Шандыбин, В.Н. Таран, Х.Ш. Кульбикаян // Цифровые инфокоммуникационные технологии. Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, посвященная 40-летию факультета "Информационные технологии управления" и 50-летию кафедры "Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте". Ростов-на-Дону. – 2022. – С. 343-346;

33 Шандыбин, А.В. Моделирование электромагнитных связей компонентов железнодорожного электротехнического комплекса / А.В. Шандыбин // Транспорт: наука, образование, производство. Ростов-на-Дону. – 2022. – С. 265-269;

34 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.

