

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Васильченко Дмитрий Владимирович

**МЕТОДИКА АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА
РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ**

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Ромащенко Михаил Александрович
доктор технических наук, доцент

Воронеж 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭМП НА РЭС	11
1.1 Основные аспекты электромагнитной совместимости в радиоэлектронных модулях	12
1.2 Анализ влияния электромагнитных помех на работу РЭМ	14
1.3 Современные методы математического моделирования ЭМП.....	17
1.4 Моделирование эффектов электромагнитных помех с помощью искусственного интеллекта.....	19
1.5 Классические методы тестирования РЭМ на влияние ЭМП.....	27
2 ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП НА РЭМ	33
2.1 Использование графов для моделирования структуры РЭМ.....	33
2.2 Алгоритмы обработки графа РЭМ.....	35
2.3 Процесс преобразования печатной платы в граф.....	45
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЭМП НА РЭМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	51
3.1 Процесс создания датасета для обучения нейросети с графовыми представлениями компонентов и соединений.	51
3.2 Описание архитектуры нейросети и алгоритма её обучения.....	56
3.3 Описание методики анализа влияния ЭМП с использованием графовых нейронных сетей.....	60
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ	68
4.1 Описание тестового радиоэлектронного модуля.....	68
4.2 Моделирование тестового РЭМ в CST Studio.....	70
4.3 Экспериментальные исследования разработанной методики.....	80
4.4 Выводы.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБЗНАЧЕНИЙ.....	93

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В связи с широким распространением и усложнением радиоэлектронных средств (РЭС) с одной стороны и увеличением числа источников электромагнитных помех (ЭМП) с другой стороны, решение задач обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) становится все более актуальной. Непреднамеренное воздействие ЭМП на работу РЭС как в целом, так и на входящие в его состав радиоэлектронные модули (РЭМ) может серьезно влиять на качество функционирования, снижая производительность, надежность, а в некоторых случаях приводить к сбоям в работе и прерыванию связи. Именно этим обусловлено введение в ГОСТ Р 50397–2011 требования о необходимости функционирования технических средств с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке. При этом под ЭМП понимается любое электромагнитное явление способное ухудшить качество функционирования РЭС или РЭМ. Следует отметить, что из существующих уровней обеспечения ЭМС (межсистемный, внутрисистемный, внутриаппаратурный) наиболее эффективное решение подобных задач обеспечивается именно на самых начальных этапах разработки и проектирования печатного модуля, т.е. на внутриаппаратурном уровне.

Традиционные подходы предиктивного обеспечения помехоустойчивости РЭМ характеризуются низкой точностью и длительностью времени расчета, что существенно ограничивает их возможность для комплексного моделирования и эффективного применения в практических инженерных задачах. Вместе с тем, в последние годы для решения схожего класса задач в смежных областях широкое распространение получили подходы на основе искусственных нейронных сетях (ИНС). Особенно перспективными представляются глубокие нейронные сети, позволяющие существенно улучшать точность анализа данных и повышать вероятность прогнозирования благодаря способности обучаться на многомерных больших данных и автоматически выявлять сложные зависимости. Широкое применение глубоких нейронных сетей в последние годы стало возможным

благодаря значительному увеличению вычислительных мощностей, развитию специализированных алгоритмов и библиотек для обучения и работы с нейросетями.

Применение нейросетей в задачах обеспечения требований ЭМС при проектировании РЭС является перспективной и актуальной областью научных исследований. Одним из направлений в этой области является повышение помехоустойчивости проектируемых изделий, т.е. обеспечение требуемого качества функционирования РЭМ. Такая задача характеризуется большими многомерными данными формируемыми в результате изменения различных параметров – характеристики рабочих сигналов, временные ряды измерений, пространственное распределение электромагнитных полей, материалы и топология компонентов, а также существующая электромагнитная обстановка.

Таким образом, подходы с использованием нейросетевых моделей могут существенно улучшить процессы обнаружения и классификации помех, а также обеспечить разработку более эффективных технических решений в части защиты РЭМ от воздействия внешних ЭМП, что особенно актуально в условиях возрастающей насыщенности электромагнитной обстановки.

Степень разработанности темы. Несмотря на большое количество публикаций в области ЭМС как от зарубежных исследователей (Т. Hubing, С. Paul, С. Tong, Н Ott, D. Weston, М Montrose, Т. Williams, R. Morrison, D. White, E. Nabiger), так и отечественных (Кечиев Л.Н., Седельников Ю.Е., Чермошенцев С.Ф., Гизатуллин З.М., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П.) многие научно–технические аспекты связанные с анализом воздействия внешних электромагнитных помех на радиоэлектронные модули и повышения их помехоустойчивости исследованы в недостаточной степени:

Цель работы – повышение эффективности проектирования радиоэлектронных модулей в части обеспечения требований ЭМС за счет разработки и совершенствования методики анализа влияния электромагнитных помех с применением искусственных нейронных сетей. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы анализа влияния ЭМП на радиоэлектронные модули и выявить список основных факторов, влияющих на качество их функционирования;

- выполнить модификацию стандартных нейросетевых моделей для учета характерных особенностей анализа влияния ЭМП;

- предложить способ представления обучающих данных для нейронной сети, учитывающих схемотехнические и конструктивно–технологические параметры РЭМ, а также возможное поведение устройства при влиянии внешних полей с учётом их параметров (частотный диапазон воздействия, уровни напряженности электромагнитного поля согласно ГОСТ Р 51317.4.3–2006 и ГОСТ Р 51317.4.6–2006, тип модуляции и форма сигнала, поляризация и направление распространения) [1, 2, 3, 4];

- разработать алгоритм обучения нейронной сети и провести его интеграцию в существующий жизненный цикл проектирования радиоэлектронных модулей;

- разработать методику анализа влияния электромагнитных полей на радиоэлектронные модули на основе разработанного подхода с использованием нейронных сетей;

- выполнить разработку экспериментального стенда и провести практическое исследование предложенной методики в процессе проектирования радиоэлектронных модулей для подтверждения соответствия принимаемых решений нормативным стандартам ЭМС.

Объектом исследования является задача обеспечения требований ЭМС радиоэлектронных средств в части воздействия ЭМП. **Предметом исследования** является методика анализа влияния ЭМП на качество функционирования РЭМ с применением нейронных сетей.

Научная новизна работы. В данной диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующие научной новизной:

- математическая модель оценки влияния внешних электромагнитных помех, отличающаяся применением графов для описания топологии радиоэлектронного

модуля с учетом особенностей задач обеспечения электромагнитной совместимости;

– алгоритм обучения нейронной сети, отличающийся способом преобразования в векторное представление исходных данных, получаемых в процессе моделирования и тестирования радиоэлектронных модулей на воздействие внешних электромагнитных помех;

– методика анализа влияния внешних электромагнитных помех на радиоэлектронные модули, интегрированная в сквозной цикл проектирования и отличающаяся использованием графовых нейронных сетей внимания.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в создании методологии анализа и оценки воздействия электромагнитных помех на проектируемые электронные устройства с использованием глубоких нейронных сетей. При этом используются модифицированные нейросетевые модели и алгоритмы обработки исходных данных, позволяющие прогнозировать поведения устройств под воздействием ЭМП на различных стадиях жизненного цикла изделия. Разработанные нейронные сети учитывают сложные взаимодействия различных параметров ЭМП, что позволяет анализировать и прогнозировать с высокой вероятностью возможные отклонения в работе РЭМ. Показано, что использование алгоритмов линейной классификации и нейронных сетей значительно улучшает точность диагностики и прогнозирования, что вносит вклад в развитие теории моделирования и анализа электромагнитных помех.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении программно–аппаратного комплекса для автоматизированной оценки устойчивости РЭМ к ЭМП. Такой подход позволяет на ранних стадиях проектирования выявлять и устранять потенциальные уязвимости, что снижает затраты на последующую доработку и тестирование радиоэлектронных устройств.

Предложенная методика интегрируется в существующий сквозной цикл проектирования РЭМ, обеспечивая возможность проведения оперативного анализа

конструкционных и/или схемотехнических решений. В отличие от традиционных методов численного моделирования электромагнитных полей и анализа помехоустойчивости, требующих значительного времени и вычислительных ресурсов, разработанная нейросетевая модель позволяет значительно сократить время анализа.

Основные результаты работы в виде моделей и методик внедрены на предприятиях: АО «Концерн «Созвездие», АО НВП «Протек», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ» для подготовки магистров по направлению 11.04.03 Конструирование и технология радиоэлектронных средств и 12.04.01 Приборостроение. По результатам выполнения диссертационного исследования было получено шесть Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на полезную модель.

Диссертационное исследование было выполнено в ФГБОУ ВО «ВГТУ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Молодежная лаборатория помехоустойчивых систем связи и управления наземными и воздушными беспилотными роботизированными аппаратами» FZGM–2024–0003. Основные результаты диссертационного исследования использовались при выполнении ГБ 2019.17 «Исследование и разработка методов комплексного анализа и оптимального синтеза на этапах функционального и конструкторского проектирования РЭС» и ГБ 2022.17 «Исследование и разработка сквозных методов комплексного цифрового проектирования и технологии производства радиоэлектронных средств и приборов».

Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам области исследования паспорта специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»: п.7 «Разработка и исследование методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, включая радиосистемы телевидения и связи, методов разрушения и защиты информации в этих системах», п. 11 «Разработка информационных технологий, в том числе цифровых, а также с использованием нейронных сетей для распознавания

сигналов, изображений и речи в интеллектуальных радиотехнических, робототехнических системах технического зрения» и п.16 «Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания, и сертификации радиотехнических устройств и систем, включая черно–белые, цветные, спектрональные, инфракрасные, х4терагерцовые и многоракурсные телевизионные системы, пассивные и активные системы объемного телевидения, в том числе голографические».

Методология и методы исследования основываются на принципах системного подхода, электродинамики, теории электромагнитной совместимости и помехоустойчивости, теории цепей, методах математической физики, вычислительной математики, математического программирования и оптимизации, математического моделирования и экспериментального исследования, теории автоматизированного проектирования.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обосновывается использованием апробированных базовых математических моделей из ПО CST STUDIO, Advanced Design System, а также классических и современных численных методов решения; использованием поверенных измерительных средств, автоматизированных систем регистрации и обработки экспериментальных данных в реальном масштабе времени, методов планирования и проведения эксперимента; согласованностью теоретических результатов с собственными экспериментальными данными и данными других авторов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно–технических конференциях и форумах:

- Международной научно–технической конференции «Радиолокация, навигация, связь – RLNC» в период с 2022 по 2024 гг., г. Воронеж;
- Всероссийском инженерном конкурсе (ВИК) 2022 г., г. Москва;
- Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации ФТИ» в период с 2017 по 2021 гг., г. Екатеринбург;

– Международный форум «Наука будущего – наука молодых» и Международная конференция «Наука будущего – наука молодых» 2019 г., г. Сочи;

– Конкурс научно–исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий «Научная опора Воронежской области» 2024 гг., г. Воронеж.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 15 научных работ, из них 9 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, 6 тезисов в сборниках трудов международных и всероссийских научно–технических конференций (две включены в базу данных Scopus). Имеется 5 зарегистрированных программ для ЭВМ и один патент на полезную модель.

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Часть результатов получена с соавторами публикаций. Основной вклад автора заключается в разработке математического, алгоритмического и программного обеспечения для достижения сформулированной цели исследования, а также в разработке экспериментального стенда, постановке экспериментов и обработке полученных данных.

Структура и объем работы. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 52 наименований и 2 приложения. Объем диссертации с приложениями – 108 с., в т.ч. 38 рисунков и 4 таблицы.

1 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭМП НА РЭС

Быстрое развитие и повсеместное внедрение электронных устройств в различных отраслях требует надежных решений для обеспечения их надежной работы в различных условиях. ЭМП представляют собой серьезную проблему, влияющую на надежность устройств, что обуславливает необходимость разработки эффективных стратегий диагностики и снижения уровня помех. Последние разработки в области искусственного интеллекта, в частности машинного обучения, открывают перспективные возможности для решения этих проблем путем усовершенствованного анализа, прогнозирования и смягчения последствий влияния ЭМП. Целью данного обзора литературы является систематическое изучение наиболее актуальных и последних исследований по использованию ИИ/МО для диагностики ЭМП в электронных устройствах. Рассматривая современные методологии, исследования и результаты, целью обзора является необходимость подчеркнуть текущие возможности, выявить пробелы в знаниях и предложить направления для будущих исследований, тем самым подтвердив научную новизну и актуальность интеграции ИИ/МО в диагностику ЭМП.

Под влиянием ЭМП на радиоэлектронное устройство понимается нарушение в его работе, вызванное внешними электромагнитными полями. Такими нарушениями могут являться как полные отказы устройства и/или его составных частей, так и частичные сбои и потеря данных. Источники ЭМП разнообразны: от природных явлений, таких как молния, до антропогенных источников, таких как мобильные телефоны, промышленное оборудование, вышки связи и источники преднамеренных помех. По мере того, как электронные устройства становятся все более неотъемлемой частью повседневной жизни и критической инфраструктуры, увеличивается вероятность сбоев, вызванных ЭМП, что делает снижение их влияния и анализ ЭМП важнейшей областью исследований. Выявление и смягчение воздействия ЭМП на электронные устройства сопряжено со значительными трудностями. К ним относятся сложность конструкций электронных устройств, разнообразие потенциальных источников ЭМП и

непостоянство влияния ЭМП на различные устройства. Традиционные подходы к снижению ЭМП, такие как экранирование, заземление и фильтрация, требуют точных данных об источнике ЭМП и его характеристиках, а также путях взаимодействия с конечным устройством, которые в некоторых случаях, невозможно получить.

1.1 Основные аспекты электромагнитной совместимости в радиоэлектронных модулях

ЭМС определяется как способность радиоэлектронного средства функционировать без нарушения его характеристик и без создания неприемлемых электромагнитных помех для других средств и систем в окружающей среде (IEC 60050–161:1990, ГОСТ Р 51317.4.3–2006, ГОСТ Р 51317.4.6–2006, ГОСТ Р 51318.22–2011, ГОСТ Р 50030.3–2005). Критическое значение ЭМС обусловлено необходимостью защиты РЭМ от ЭМП, которые могут приводить к ухудшению характеристик устройства, сбоям в его работе и даже к его выходу из строя. В современных условиях, когда электронные устройства работают в непосредственной близости друг от друга и в сложных электромагнитных условиях, обеспечение ЭМС становится одной из ключевых задач на этапе проектирования и эксплуатации РЭМ (Куликов В.Е., 2015; Коваленко И.П., 2013). На РЭМ могут влиять несколько видов помех, которые включают в себя:

– Кондуктивные помехи, возникающие при передаче помехи через проводящие среды, такие как провода и кабели. Они могут быть вызваны источниками, работающими в близлежащих диапазонах частот, а также разрядами статического электричества и переключениями больших токов (Никулин А.М., 2017).

– Излучаемые помехи, которые передаются через электромагнитное поле и могут воздействовать на РЭМ на расстоянии. Эти помехи могут быть вызваны излучением антенн, работающих в радиочастотных диапазонах, или любыми другими источниками электромагнитного излучения [4].

– Электростатические разряды (ЭСР), представляющие собой высоковольтные импульсные разряды, которые могут возникать при контактном взаимодействии между объектами, обладающими различным электрическим потенциалом. ЭСР могут вызвать сбои в работе РЭМ, особенно чувствительных к высоким напряжениям [5].

– Импульсные помехи, возникающие при кратковременных выбросах энергии, например, при переключении мощных электромеханических устройств или при разрядах молнии. Эти помехи могут вызвать значительные колебания в электрических цепях и привести к нарушению работы РЭМ [6].

Воздействие электромагнитных помех на РЭМ может проявляться различными способами, в зависимости от природы помехи и характеристик самого устройства. Например, неправильная трассировка проводников на печатной плате может привести к образованию резонирующего контура, который усиливает воздействие ЭМП на определенной частоте. Такой резонирующий контур может существенно повысить уровень индуцированного напряжения, что в свою очередь может привести к сбоям в работе устройства или его компонент [7]. Основными параметрами, влияющими на качество функционирования радиоэлектронных модулей под воздействием электромагнитных полей, являются уровни излучаемых помех, напряженность поля, форма сигнала и его поляризация. В стандартах, таких как ГОСТ Р 51317.4.3–2006, установлены нормы по допустимым уровням напряженности электромагнитного поля и требования по устойчивости устройств к излучаемым помехам в диапазоне частот от 80 МГц до 1 ГГц. Эти параметры напрямую влияют на работоспособность РЭМ, и их контроль необходим для обеспечения стабильной работы системы

Важность обеспечения ЭМС становится особенно заметной при проектировании высокочастотных устройств, работающих в условиях плотной электромагнитной среды, таких как мобильные телефоны, медицинские приборы и системы связи. Недостаточное внимание к ЭМС может привести к значительным проблемам на стадии эксплуатации устройства, включая снижение его надежности, частые сбои и даже выход из строя (Карпов А.В., 2012). В связи с этим, соблюдение

нормативных требований по ЭМС и внедрение эффективных методов защиты от электромагнитных помех являются обязательными для всех этапов жизненного цикла РЭС, начиная с проектирования и заканчивая эксплуатацией.

Методы обеспечения ЭМС включают экранирование, фильтрацию и развязку цепей питания. Экранирование позволяет уменьшить уровень излучаемых электромагнитных полей за счет использования специальных материалов, препятствующих прохождению электромагнитных волн. Фильтрация и развязка цепей питания позволяют снизить влияние кондуктивных помех, поступающих по силовым и сигнальным линиям. Эффективное экранирование и фильтрация, а также корректная трассировка проводников на печатной плате позволяют значительно снизить влияние электромагнитных помех на устройство [8, 9].

Проверка правильность выбранных схемотехнических решений производится несколькими способами. На начальном этапе проектирования проводится моделирование электрических схем разрабатываемых РЭМ с применением различных подходов. Однако, ни одно устройство не выпускается в массовое производство без проведения предварительных испытаний на соответствие требованиям ЭМС. Для подтверждения соответствия РЭМ требованиям ЭМС проводятся испытания на устойчивость к электромагнитным полям и собственное излучение помех. В России эти испытания регулируются ГОСТ Р 51317.4.3–2006 и ГОСТ Р 51317.4.6–2006, которые определяют методики и уровни тестирования. Испытания проводятся в экранированных камерах, где на устройство воздействуют электромагнитные поля с различными параметрами, чтобы оценить его устойчивость к помехам.

1.2 Анализ влияния электромагнитных помех на работу РЭМ

Анализ влияния ЭМП на работу РЭМ представляет собой важный этап в проектировании и эксплуатации электроники. Электромагнитные помехи могут существенно повлиять на качество функционирования РЭМ, вызывая сбои,

нарушения в передаче сигналов и даже повреждения компонентов. Источники электромагнитных помех можно разделить на внешние и внутренние.

К внешним источникам электромагнитных помех относятся радиопередатчики, электропередачи, промышленные электромагнитные поля, природные явления (грозовые разряды). Например, мощные радиопередатчики, работающие в диапазоне частот от 80 МГц до 1 ГГц, могут создавать электромагнитные поля напряженностью до 120 дБмкВ/м, что способно вызвать сбои в работе чувствительных элементов радиоэлектронных модулей. При этом воздействие может происходить не только на входные цепи, но и на внутренние связи, что особенно опасно для сложных многослойных печатных плат, где проводники могут выступать в качестве антенн и усиливать воздействие электромагнитных помех.

К внутренним источникам электромагнитных помех относятся компоненты самого устройства, которые могут генерировать высокочастотные помехи (например, микропроцессоры, импульсные источники питания). Неправильная конструкция печатных плат, неверное размещение компонентов и некачественная трассировка могут приводить к появлению резонирующих контуров, которые усиливают воздействие помех. Резонансы возникают при совпадении частоты внешнего воздействия с резонансной частотой контура, что приводит к значительному увеличению индуцируемого напряжения в цепях устройства [11].

Основной проблемой при воздействии внешних электромагнитных помех являются резонансы собственных контуров печатных проводников. Резонирующие контуры на печатных платах могут образовываться, когда длина проводников и их конфигурация соответствуют условиям для возникновения резонанса. Это может усилить воздействие электромагнитных помех на устройстве на определенной частоте. Резонансную частоту контура можно выразить формулой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

где L — индуктивность контура, C — его емкость.

Добротность контура, которая характеризует степень усиления резонансных колебаний, определяется как:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (1.2)$$

где Δf — ширина полосы пропускания резонансной частоты.

При воздействии внешнего электромагнитного поля напряжение в резонансном контуре возрастает пропорционально добротности контура Q , что приводит к значительному увеличению напряжения на компонентах устройства. Например, индуцированное напряжение $V_{\text{индуц}}$, вызванное внешним полем E , рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{индуц}} = E \cdot l_{\text{эфф}}, \quad (1.3)$$

Где $l_{\text{эфф}}$ — эффективная длина проводника, играющего роль антенны.

Резонансное напряжение может быть значительно выше индуцированного, и его величина определяется как:

$$V_{\text{рез}} = Q \cdot V_{\text{индуц}}, \quad (1.4)$$

Качество проектирования печатной платы оказывает ключевое влияние на устойчивость радиоэлектронных модулей к электромагнитным помехам и, следовательно, на их общую работоспособность. Неправильное размещение компонентов, недостаточное экранирование и ошибки в трассировке проводников могут привести к образованию резонансных контуров, которые значительно усиливают воздействие внешних электромагнитных полей. Эти резонансные явления способны многократно увеличивать индуцируемое напряжение в цепях устройства, что приводит к сбоям и выходу из строя отдельных компонентов. Таким образом, тщательное проектирование печатных плат с учётом

электромагнитной совместимости является критически важным этапом разработки радиоэлектронных модулей. Высокое качество проектирования обеспечивает снижение восприимчивости устройства к внешним воздействиям и повышает его надежность и долговечность [12].

1.3 Современные методы математического моделирования ЭМП

Существующие методы анализа воздействия электромагнитных помех на работу РЭМ можно разделить на численные методы и экспериментальные подходы. Численные методы включают математическое моделирование с использованием программного обеспечения для электромагнитного анализа, такого как метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM), метод моментов (MoM) и метод эквивалентных диполей. Эти методы позволяют проводить детальный анализ распространения электромагнитных волн, их взаимодействия с компонентами и структурами РЭМ, а также оценивать индуцируемые токи и напряжения в проводниках [14, 15].

1) Метод конечных элементов представляет собой численный метод решения дифференциальных уравнений, таких как уравнения Максвелла, которые описывают поведение электромагнитных полей. FEM заключается в разбиении сложной геометрической области на конечное число малых элементов, внутри которых поля аппроксимируются с помощью базисных функций. Основная система уравнений может быть записана в виде:

$$KE = f, \quad (1.5)$$

где K — матрица жесткости системы, E — вектор неизвестных электрических полей, f — вектор источников.

Это уравнение решается для каждого элемента, а затем результаты собираются для всей модели. FEM полезен для анализа сложных геометрических структур, включая анизотропные материалы и неоднородные среды.

2) Метод моментов представляет собой метод численного решения интегральных уравнений, описывающих электромагнитные поля на поверхности проводящих объектов. Для поверхности проводника составляется уравнение:

$$ZI = V, \quad (1.6)$$

где Z — матрица импедансов, I — вектор токов, индуцированных на проводящей поверхности, V — вектор приложенных напряжений.

МоМ широко используется для анализа антенных систем, проводящих структур и других высокочастотных устройств. Основное преимущество МоМ заключается в том, что он сводит задачу к решению линейной системы уравнений, однако объем вычислений значительно возрастает с увеличением размера системы что делает его применение очень затратным с точки зрения вычислительных ресурсов.

3) Метод эквивалентных диполей

Метод эквивалентных диполей применяется для моделирования ближнего электромагнитного поля, используя набор эквивалентных диполей вместо исходной сложной структуры. Эквивалентные диполи создают поля, эквивалентные полям исходной конструкции, что упрощает расчет:

$$V_{\text{рез}} = \sum p_i \nabla G(r, r_i), \quad (1.7)$$

где p_i — дипольный момент, $G(r, r_i)$ — функция Грина для свободного пространства.

Метод используется для анализа ближнего поля, поскольку значительно снижает вычислительную сложность задачи.

4) Экспериментальные методы включают проведение тестов на устойчивость РЭМ к электромагнитным помехам в соответствии с международными и российскими стандартами, такими как ГОСТ Р 51317.4.3–2006 и ГОСТ Р 51317.4.6–2006. Эти тесты проводят в лабораториях, оборудованных экранированными камерами и генераторами помех, что позволяет воспроизводить реальные условия

эксплуатации и оценивать устойчивость устройств к электромагнитным воздействиям.

Современные методы анализа также включают применение нейронных сетей для прогнозирования устойчивости РЭМ к помехам. Нейросети позволяют автоматизировать процесс анализа, использовать результаты предыдущих тестов и моделирования для более точного прогнозирования, сокращая время на проектирование и тестирование. В частности, графовые нейронные сети и сети внимания (ГСВ) находят широкое применение в задачах моделирования сложных структур, таких как РЭМ, за счет возможности учета топологии и связей между элементами.

1.4 Моделирование эффектов электромагнитных помех с помощью искусственного интеллекта

Исследование передовых моделей ИИ/МО для моделирования ЭМП показывает целый спектр различных методик, которые значительно расширяют возможности по прогнозированию и смягчению последствий влияния ЭМП. Благодаря интеграции глубокого обучения, нейронных сетей и различных методов оптимизации и моделирования – исследователи и инженеры могут решать сложные проблемы электромагнитных помех в электронных устройствах с высокой точностью и эффективностью. Одним из направлений в данной области является применение МО для прогнозирования поведения материалов без предварительных математических расчётов. Глубокое обучение (ГО), как подмножество машинного обучения, продемонстрировало особые перспективы в области материаловедения, которое имеет непосредственное отношение к пониманию и моделированию эффектов ЭМП. Этот подход использует искусственные нейронные сети для обработки и анализа огромных объемов данных, позволяя выявлять закономерности и делать выводы, которые ранее были недоступны. Универсальная теорема аппроксимации лежит в основе способности нейронных сетей моделировать любые функции с произвольной точностью, хотя проблемы с

эффективным обучением этих функций остаются. Важнейшие компоненты нейронных сетей, такие как перцептроны, функции активации, функции потерь и градиентный спуск, играют ключевую роль в обучении этих моделей сложным представлениям данных, которые необходимы для точного моделирования ЭМП [16]. В статье рассматриваются различные методологии ГО, включая сверточные нейронные сети (СНС), графовые нейронные сети (ГНС), обучение с подкреплением и другие, и их применение в различных аспектах материаловедения, таких как атомистическое моделирование, визуализация материалов, спектральный анализ и обработка естественного языка. В материале подчеркивается значение ГО в разработке и открытии материалов, рассматриваются ограничения и проблемы, а также предлагаются будущие направления исследований. Применение ГО при открытии новых экранирующих материалов также способствует общему развитию тематики обеспечения ЭМС.

Одной из передовых идей по внедрению ИИ в процесс проектирования РЭС является его внедрение в существующие процессы математического моделирования. Например, компания Ansys обсуждает внедрение искусственного интеллекта, МО и моделирования, подчеркивая, как эти технологии работают вместе, способствуя более эффективному и быстрому принятию решений [17]. Такой подход является наиболее правильным при решении проблемы влияния электромагнитных помех, поскольку позволяет моделировать сложную электромагнитную обстановку с повышенной точностью и эффективностью, при этом не требует с нуля собирать большие массивы данных для обучения. Интегрируя модели ИИ и МО с инструментами моделирования, исследователи и инженеры могут создавать более подробные и точные представления явлений ЭМП, что приведет к разработке более эффективных. Внедрение расчетных моделей, интегрированных с искусственным интеллектом, позволяет рассчитывать ключевые характеристики радиоэлектронных модулей на основе накопленного опыта и статистики, избегая трудоемких вычислений, таких как метод конечных элементов или метод конечных объемов. Для обеспечения такого подхода необходимо, чтобы система имела понимание физических принципов на основе

большого объема обучающих данных. В статье [18] подробно рассматриваются способы усовершенствования моделей путем учета физических законов, что значительно улучшает прогнозирование сложных и неполных наборов данных в инженерных задачах.

Основная идея заключается в том, чтобы включить физические законы, такие как уравнения, описывающие электромагнитные процессы, непосредственно в расчеты, что позволяет моделям более точно прогнозировать поведение систем, таких как радиотехнические устройства. Это особенно актуально в условиях ограниченных или неполных данных. Например, при анализе распространения электромагнитных волн в средах с неоднородностями такие модели могут эффективно балансировать между точностью данных и соблюдением физических законов.

Подобные методы позволяют улучшить оценку характеристик радиомодулей в условиях воздействия электромагнитных помех и предлагают новые возможности для оптимизации работы устройств, минимизируя количество физических экспериментов и повышая точность расчетов.

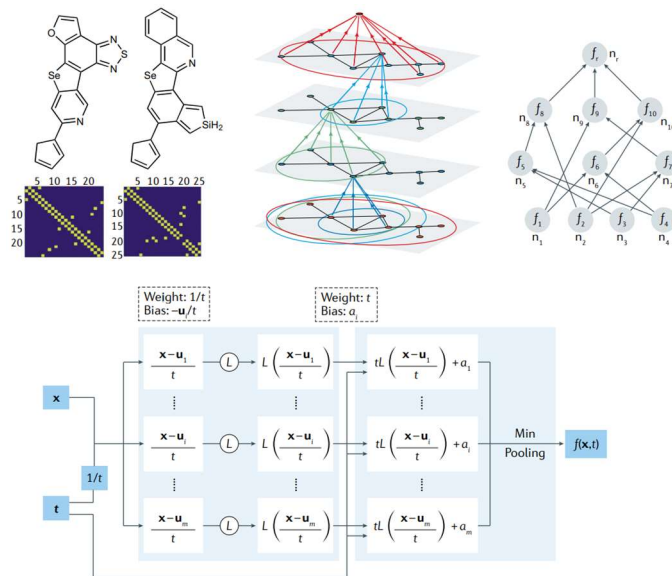


Рисунок 1.1 – Структура сети на основе физических законов

Процесс обучения моделей для анализа радиоэлектронных модулей на основе физических данных заключается в интеграции физических законов с

традиционными методами анализа, основанными на данных экспериментов. Такой подход использует преимущества теоретической физики и методов машинного обучения для решения уравнений, управляющих поведением электрических и электромагнитных систем. В качестве обучающего набора данных используют результаты наблюдений или экспериментальных исследований, связанных с функционированием радиоэлектронных модулей. Эти данные могут включать измерения параметров, таких как токи, напряжения и электромагнитные поля, в различных точках системы.

Основная идея заключается в том, чтобы обучить модель не только соответствовать измеренным данным, но и учитывать физические законы, такие как уравнения Максвелла или уравнения цепей, которые описывают электромагнитные процессы в устройствах [19, 20, 21]. Данные обрабатываются в двух потоках:

- 1) Данные наблюдений – результаты экспериментов и измерений параметров радиоэлектронных систем, которые используются для традиционного обучающего процесса. Модель учится сопоставлять входные и выходные параметры (например, уровни напряжения и частотные характеристики).

- 2) Физические законы – дифференциальные уравнения, описывающие процессы распространения электромагнитных полей и взаимодействие компонентов, включаются в процесс обучения как ограничения. Модель обучается минимизировать функцию потерь, которая включает расхождение между спрогнозированными параметрами системы и экспериментальными данными, а также отклонения от физических законов.

Функция потерь в таком подходе состоит из двух компонентов:

- 1) Член расхождения данных, который измеряет разницу между прогнозами модели и наблюдаемыми параметрами, например, напряжением на выходе устройства или уровнем электромагнитного излучения.

- 2) Физический член, который оценивает, насколько прогнозы модели соответствуют основным физическим уравнениям, управляющим системой, что

гарантирует корректное поведение в условиях неполных данных или сложных конструкций радиоэлектронных модулей.

Автоматическое дифференцирование используется для вычисления градиентов физически–информационного члена относительно параметров сети, что позволяет сети изучать сложные взаимосвязи, диктуемые физическими законами. Градиентный спуск или его разновидности (например, оптимизатор Адама) являются широко используемыми алгоритмами оптимизации в данном контексте.

В уравнениях 1.8 – 1.10 приведен общий вид функции потерь.

$$\text{Loss} = \text{Loss}_{data} + \text{Loss}_{physi} \quad (1.8)$$

$$\text{Loss}_{data} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|y_i - NN(x_j)\|^2, \quad (1.9)$$

где NN – прогноз НС для выхода x_j и y_j соответствующее наблюдаемое значение.

$$\text{Loss}_{physics} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \|G(NN(x_k), \nabla NN(x_k), \nabla^2 NN(x_k), \dots, x_k)\|^2, \quad (1.10)$$

где M – количество точек, в которых оцениваются физические законы, и NN(x_k) – обозначает аппроксимацию нейронной сетью решения u в точке x_k .

В контексте прогнозирования эффектов ЭМП – принципы, описанные в ФИНС могут быть использованы для моделирования взаимодействия между электромагнитными полями и электронными схемами. Физические законы, управляющие распространением электромагнитного поля и взаимодействием с материалами (уравнения Максвелла), могут быть непосредственно включены в функцию потерь нейронной сети. Это обеспечивает соответствие прогнозов сети фундаментальным электромагнитным принципам, повышая точность и надежность прогнозов.

Опираясь на структуру самих РЭМ можно сделать вывод что наиболее предпочтительным и емким вариантом описания модуля является преобразование его параметров в графовую форму. Преобразование параметров РЭМ в графовую форму – эффективный способ структурирования данных о компонентах и их соединениях для дальнейшего анализа. В этой форме узлы графа представляют собой элементы (резисторы, конденсаторы, транзисторы и т.д.), а рёбра – электрические соединения между ними, которые обладают своими характеристиками, такими как индуктивность, сопротивление и ёмкость. Такой формат данных может быть обработан с применением ГНС, которые позволяют учитывать не только локальные связи между элементами, но и глобальные структурные особенности модуля, что особенно важно при оценке устойчивости к ЭМП. Например, ключевым моментом может стать влияние паразитных индуктивностей и ёмкостей, которые могут усиливать воздействие помех на определённых частотах. Применение ГНС позволяет спрогнозировать такие эффекты, выявляя уязвимые участки конструкции и оптимизировать параметры соединений и размещение компонентов.

Алгоритмы ГНС могут быть адаптированы для анализа структурных свойств модуля, таких как выявление критически важных элементов цепи и прогнозирование того, как изменения в топологии или электрических свойствах будут влиять на поведение устройства под воздействием внешних полей. Входными данными для такой сети могут быть параметры компонентов и межсоединений, их пространственное расположение, а также характеристики внешних полей (напряженность, частота, поляризация).

Что касается интеграции ГНС в жизненный цикл изделия – гибкость алгоритмов позволяет использовать их на нескольких этапах (рисунок 1.2).

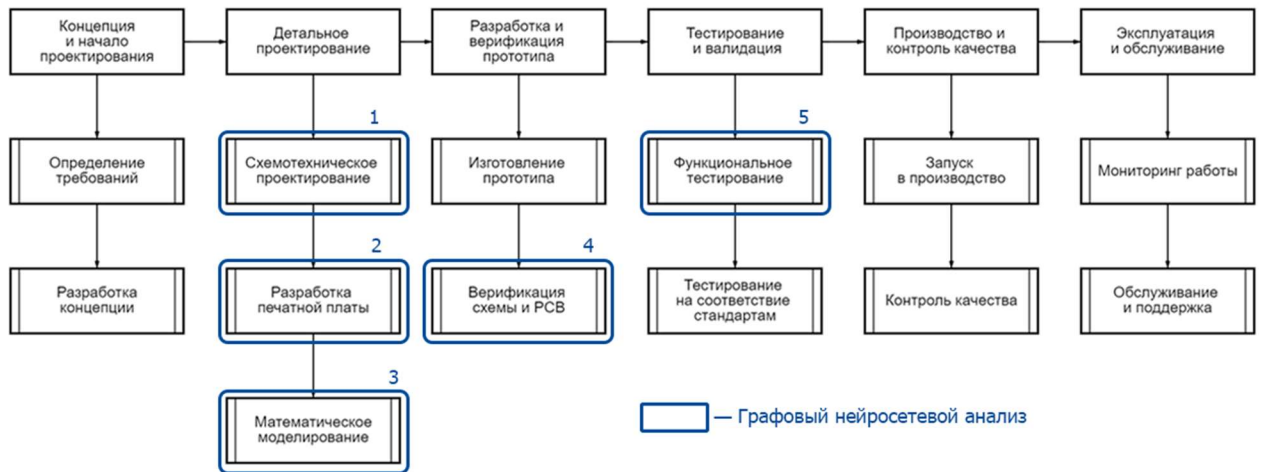


Рисунок 1.2 – Интеграция нейронных сетей в интегрированный в сквозной цикл проектирования радиоэлектронных модулей

При проектировании печатной платы (пункты 1, 2 на рисунке 1.2) ГНС, преобразующие параметры трассировки и размещения компонентов в графовую структуру, способны оценить взаимное влияние проводников и элементов платы, минимизируя вероятность появления конструктивных особенностей, которые могут усилить воздействие помех. На этапе математического моделирования (пункт 3 на рисунке 1.2) ГНС используются для быстрой оценки различных конструктивных решений и их устойчивости к ЭМП, что существенно снижает необходимость в применении трудоёмких методов, таких как метод конечных элементов или метод моментов, позволяя оптимизировать проектирование.

Верификация схемы и печатной платы (пункт 4 на рисунке 1.2) с использованием ГНС позволяет прогнозировать результаты тестов на электромагнитную совместимость (ЭМС), что значительно снижает количество необходимых физических прототипов. На этапе функционального тестирования (пункт 5 на рисунке 1.2) ГНС могут анализировать поведение устройства при реальных электромагнитных воздействиях, сопоставляя результаты с прогнозами модели и выявляя потенциальные отклонения на ранних стадиях тестирования. Этот подход позволяет существенно ускорить процесс разработки и повысить точность прогнозирования устойчивости РЭМ к ЭМП [22, 23].

Исходя из вышеописанных подходов к анализу влияния ЭМП на РЭМ могут быть сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Цель работы – повышение эффективности проектирования радиоэлектронных модулей в части обеспечения требований ЭМС за счет разработки и совершенствования методики анализа влияния электромагнитных помех с применением искусственных нейронных сетей. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы анализа влияния ЭМП на радиоэлектронные модули и выявить список основных факторов, влияющих на качество их функционирования;

- выполнить модификацию стандартных нейросетевых моделей для учета характерных особенностей анализа влияния ЭМП;

- предложить способ представления обучающих данных для нейронной сети, учитывающих схемотехнические и конструктивно–технологические параметры РЭМ, а также возможное поведение устройства при влиянии внешних полей с учётом их параметров (частотный диапазон воздействия, уровни напряженности электромагнитного поля согласно ГОСТ Р 51317.4.3–2006 и ГОСТ Р 51317.4.6–2006, тип модуляции и форма сигнала, поляризация и направление распространения);

- разработать алгоритм обучения нейронной сети и провести его интеграцию в существующий жизненный цикл проектирования радиоэлектронных модулей;

- разработать методику анализа влияния электромагнитных полей на радиоэлектронные модули на основе разработанного подхода с использованием нейронных сетей;

- выполнить разработку экспериментального стенда и провести практическое исследование предложенной методики в процессе проектирования радиоэлектронных модулей для подтверждения соответствия принимаемых решений нормативным стандартам ЭМС.

1.5 Классические методы тестирования РЭМ на влияние ЭМП

Тестирование устройств на воздействие внешних электромагнитных полей является важной частью процесса сертификации и оценки их устойчивости к электромагнитным помехам. Одним из наиболее распространенных методов является проверка радиочастотного излучения согласно ГОСТ Р 51317.4.3–2006 (аналог IEC 61000–4–3). Этот метод направлен на оценку устойчивости к радиочастотным электромагнитным полям в диапазоне частот от 80 МГц до 1 ГГц. В процессе тестирования устройство помещается в безэховую камеру, где оно подвергается воздействию электромагнитного поля, генерируемого специальным оборудованием. Параметры работы устройства, такие как токи, напряжения и частоты, измеряются, чтобы оценить его устойчивость. Важно отметить, что тестирование проводится под разными углами и с изменением поляризации, чтобы выявить все возможные уязвимости схемы. Этот метод позволяет точно оценить, как внешние электромагнитные поля могут повлиять на работу устройства, и дает возможность разработать улучшения для защиты от помех [24, 25, 26]. При этом все тесты проводятся в безэховых камерах (рисунок 1.3).

Еще одним вариантом тестирования является тестирование на электромагнитные импульсы, которое используется для оценки устойчивости РЭМ к мощным импульсным воздействиям, вызванным различными источниками, такими как удары молний, коммутирующие события (например, включение или отключение мощного оборудования) или электростатические разряды. Для этого используется стандарт ГОСТ Р 51317.4.5–2006, аналогичный международному стандарту IEC 61000–4–5.



Рисунок 1.3 – Безэховая камера с установленным оборудованием

Процесс тестирования состоит из следующих этапов:

— Подготовка устройства. Тестируемое устройство подключается к испытательной установке через специальные входные цепи, которые включают силовые линии, линии данных и другие функциональные интерфейсы.

— Генерация импульсов. Устройство подвергается воздействию мощных электромагнитных импульсов, генерируемых испытательной установкой. Эти импульсы обладают высокой энергией, которая обычно выражается в киловольтах (кВ) или амперах (А). Частота импульсов может варьироваться, но в большинстве случаев выбираются параметры, имитирующие реальное воздействие молний или переключений в сети.

— Подача на различные цепи. Импульсы подаются на разные входы устройства, включая силовые линии и линии передачи данных. Цель тестирования – выявить, как устройство справляется с такими высокоэнергетическими импульсами, какие цепи более уязвимы и где могут возникнуть повреждения.

— Регистрация результатов. Во время воздействия импульсов оцениваются такие параметры устройства, как восстановление нормальной работы после импульса, отсутствие или наличие повреждений в цепях и компонентах, а также уровень помехоустойчивости.

Такое тестирование позволяет выявить слабые места в конструкции устройства, которые могут быть уязвимы для молниевых разрядов или резких изменений электрического поля. В случае обнаружения уязвимостей, тестирование помогает выявить необходимость внесения изменений в конструкцию или включения дополнительных защитных элементов, таких как варисторы, разрядники или фильтры.

Наибольший интерес в разрезе данной работы вызывает тестирование на воздействие электромагнитного излучения высокой частоты (от 10 кГц до 18 ГГц). Данный вид тестирования используется для оценки устойчивости РЭМ к высокочастотным помехам, которые могут возникать в условиях их расположения близко к мощным передатчикам, антеннам или другим источникам высокочастотных сигналов. Данное тестирование проводится в соответствии с международными и национальными стандартами, такими как ГОСТ Р 51317.4.3–2006 и ИЕС 61000–4–3.

Тестирование начинается с подготовки устройства к воздействию. Устройство устанавливается в безэховую камеру, что исключает влияние внешних электромагнитных сигналов. Внутри камеры создается контролируемое радиочастотное поле с помощью направленных антенн, которые размещаются на определенном расстоянии от тестируемого устройства. Для контроля направленности и интенсивности поля применяются как изотропные, так и направленные антенны. Основная цель тестирования — проверка работоспособности устройства при воздействии высокочастотного электромагнитного поля разной мощности и частоты. Частоты выбираются на основании спецификации устройства или в зависимости от стандартных диапазонов, указанных в ГОСТ, например, от 10 кГц до 18 ГГц, с шагом измерений в 10–20 МГц.

Перед началом испытаний проводится калибровка уровня электромагнитного поля в камере для точного воспроизведения заданных параметров. Калибровка поля производится при помощи измерительных датчиков, расположенных на том же месте, где будет находиться устройство.

Устройство включается и на него подается электромагнитное излучение. Частота и мощность поля постепенно увеличиваются. Диапазон частот охватывает от десятков килогерц до десятков гигагерц (в зависимости от заданных условий в ТЗ на изделие. Мощность поля обычно начинается с нескольких вольт на метр (В/м), постепенно увеличиваясь до максимальных значений, соответствующих рабочим условиям устройства или до допустимых пределов, установленных стандартами (например, до 10 В/м) [27].

Во время тестирования измеряются функциональные параметры устройства, такие как:

- Напряжение и ток в цепях.
- Стабильность выходного сигнала.
- Частота сигнала.
- Выходная мощность.
- Чувствительность приемных каналов.

Эти параметры проверяются на соответствие заявленным характеристикам. В случае возникновения сбоев в работе устройства (например, отклонения частоты, нестабильность сигнала или отключения), фиксируются параметры, при которых возникли проблемы. В процессе тестирования устройство подвергается воздействию поля под различными углами, что позволяет оценить устойчивость к электромагнитным помехам при изменении направления источника излучения. Такой подход особенно важен при тестировании мобильных устройств, которые могут подвергаться воздействию внешних полей различной поляризации.

В процессе тестирования фиксируются любые сбои в работе устройства, такие как перезагрузки, отключение или ухудшение выходных характеристик. Также проводится измерение времени восстановления работы устройства после прекращения воздействия поля. Если устройство полностью или частично

восстанавливает свои функции после прекращения излучения, это фиксируется в отчетах.

После проведения испытаний составляется отчет о том, как устройство реагировало на разные частоты и уровни поля. Данный отчет включает в себя следующую информацию:

- 1) Полное восстановление устройства после воздействия (нормальная работа).
- 2) Частичное восстановление (отклонения в работе, которые устраняются после перезагрузки).
- 3) Невозможность восстановления без вмешательства (критические сбои).

В таблице 1.1 приведен пример итоговый проведения тестирования устройства.

Испытания радиоэлектронных модулей (РЭМ) на воздействие электромагнитных помех (ЭМП) являются комплексными, охватывающими широкий диапазон частот и типов помех, чтобы максимально точно оценить работоспособность устройства в реальных условиях эксплуатации.

Эти тесты включают воздействие на РЭМ внешних электромагнитных полей в диапазоне от 10 кГц до 18 ГГц, что позволяет проверить устойчивость устройства к возможным воздействиям, как от других электронных систем, так и от мощных передатчиков и антенн. Процесс тестирования может включать воздействие полей различной мощности и частоты, что делает испытания длительными и трудоемкими, особенно если необходимо охватить полный спектр взаимодействий [28].

Каждое устройство должно проходить тестирование на всех заданных частотах с различной интенсивностью полей, что требует значительных временных затрат. В процессе испытаний проверяется работоспособность устройства, его восстановление после воздействия, а также отклонения от номинальных параметров. Все это способствует комплексной оценке устойчивости к помехам и определению точек отказа или недостатков конструкции.

Таблица 1.1 – Пример записи результатов проведенных экспериментов

Частота (ГГц)	Напряженность поля (В/м)	Результат работы устройства	Время восстановления (мс)	Отклонения
1	3	Нормальная работа	–	Нет
2.5	5	Снижение выходной мощности на 5%	50	Временные сбои
5	10	Полная потеря сигнала	200	Критический сбой
10	3	Перезагрузка	300	Перезагрузка устройства
15	6	Нормальная работа после воздействия	–	Нет

Кроме того, для тестирования на влияние ЭМП необходимо задействовать специализированные лабораторные установки, такие как безэховые камеры и направленные антенны, что также удлиняет процесс испытаний. В итоге, испытания на ЭМП, если охватывают полный спектр частот и направлений воздействия, могут занимать длительное время, но они являются важнейшим элементом процесса проверки соответствия устройства стандартам электромагнитной совместимости и обеспечения его надёжной работы в реальных эксплуатационных условиях.

2 ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП НА РЭМ

2.1 Использование графов для моделирования структуры РЭМ

Как уже было сказано ранее – для точного анализа воздействия электромагнитных помех на РЭМ целесообразно представлять структуру устройства в виде графа. Графовая модель позволяет учитывать топологию устройства и его физические параметры. При этом вершины как правило представляют собой радиоэлектронные компоненты (резисторы, конденсаторы, микросхемы и т.д.), а рёбра – электрические соединения между компонентами. Атрибуты вершин включают тип компонента, номинал, координаты на плате и слой размещения. Атрибуты рёбер включают параметры межсоединений, такие как индуктивность, ёмкость, сопротивление и текущие параметры цепи, такие как токи, напряжения, частоты и д.р. Общий вид графа представляется в виде выражения $G = (V, E, W, X, A)$, который включает определение множества вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$; множества рёбер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$; W – весовые коэффициенты ребер, отражающие степень влияния связи на общее поведение устройства под влиянием ЭМП; X – матрица признаков вершин; A – матрица смежности, используемая для представления соединений между компонентами

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

где $A[i,j] = 1$, если компоненты v_i и v_j соединены и 0 в противном случае.

При этом матрица признаков X включает атрибуты компонентов:

$$X = \begin{pmatrix} t_i & v_i & x_i & y_i & z_i & l_i \\ t_i & v_i & x_i & y_i & z_i & l_i \\ t_i & v_i & x_i & y_i & z_i & l_i \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

где t_i – тип компонента, v_i – номинал, (x_i, y_i, z_i) – координаты, l_i – слой.

Для анализа графа используется матрица Лапласиана L :

$$L = D - A, \quad (2.3)$$

где D – диагональная матрица степеней вершин, A – матрица смежности.

Если переходить к непосредственному применению такого подхода, то можно проиллюстрировать пример использования следующим образом. Для анализа правильности компоновки и проектирования РЭМ берутся два варианта устройства. Заведомо верно спроектированное (рисунок 2.1 (б)) и то же самое устройство с ошибками в проектировании (рисунок 2.1 (в)).

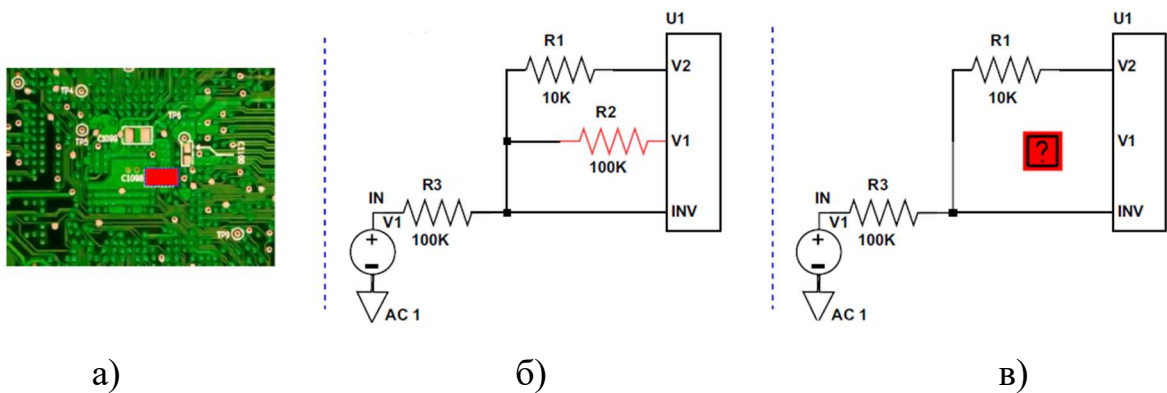


Рисунок 2.1 Процесс формирования данных для графового анализа: а – исходное устройство, б – верная компоновка, в – заведомо ложная компоновка.

Далее два набора данных преобразуются в графовый вид путём представления всех элементов устройства по описанному в формулах 2.1 – 2.3 принципу. Схематичное изображение процесса представлено на рисунке 2.2.

При анализе графа выявляются критические узлы и рёбра, а также производится оценка уязвимости компонентов к воздействию ЭМП. На рисунке 2.3 представлена структурная схема способа формирования графа свойств РЭМ на основе данных о печатной плате.

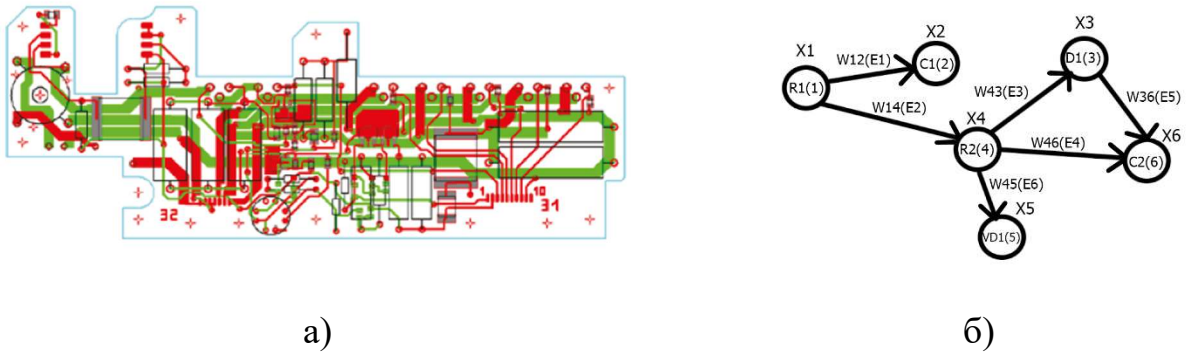


Рисунок 2.2 Представление печатной платы в виде графа: а) – рисунок печатной платы, б) – граф печатной платы

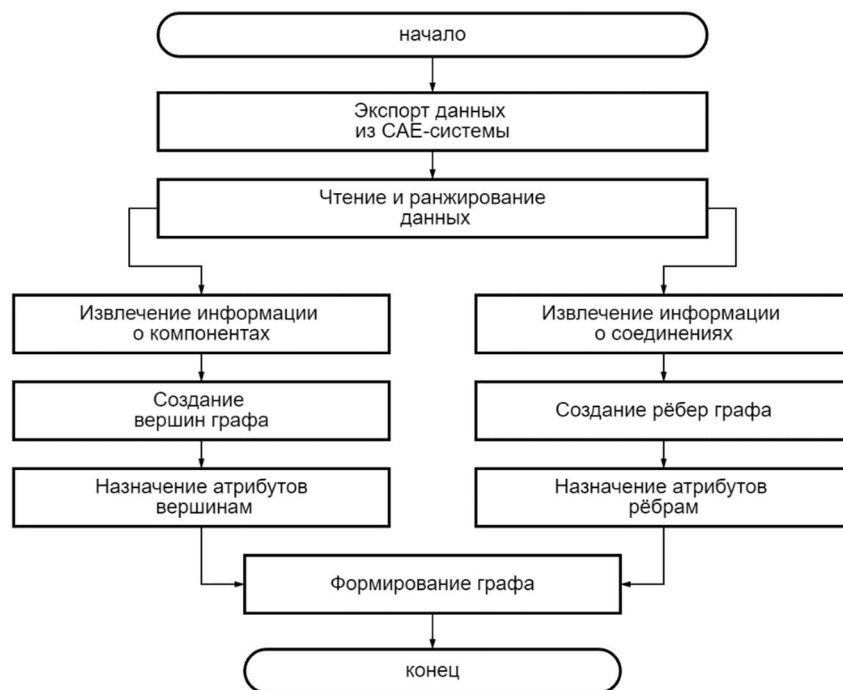


Рисунок 2.3 – Структурная схема способа формирования графа свойств РЭМ на основе данных о печатной плате

2.2 Алгоритмы обработки графа РЭМ

Далее следует процесс преобразования графового представления свойств РЭМ в числовые векторы, которые могут быть непосредственно обработаны нейронной сетью. Преобразование графа в векторный формат является важным шагом для использования ГНС [29]. Процесс преобразования графа в векторные

представления позволяет сохранить структурную информацию о схеме, необходимую для обучения моделей машинного обучения.

Существует ряд методов, позволяющих произвести преобразование графа в векторный вид.

1) GraphSAGE — это алгоритм индуктивного обучения на графах, разработанный для работы с большими и изменяющимися во времени графами. В отличие от традиционных методов, которые требуют хранения всего графа, GraphSAGE обучается на выборках соседей каждого узла, что снижает вычислительные затраты. Алгоритм выполняет агрегацию информации от соседей узла через несколько итераций, используя обучаемые функции агрегации, такие как среднее, LSTM или пулинг. Этот процесс позволяет сформировать векторное представление узлов, учитывающее как их локальные связи, так и общую топологию графа (рисунок 2.4).

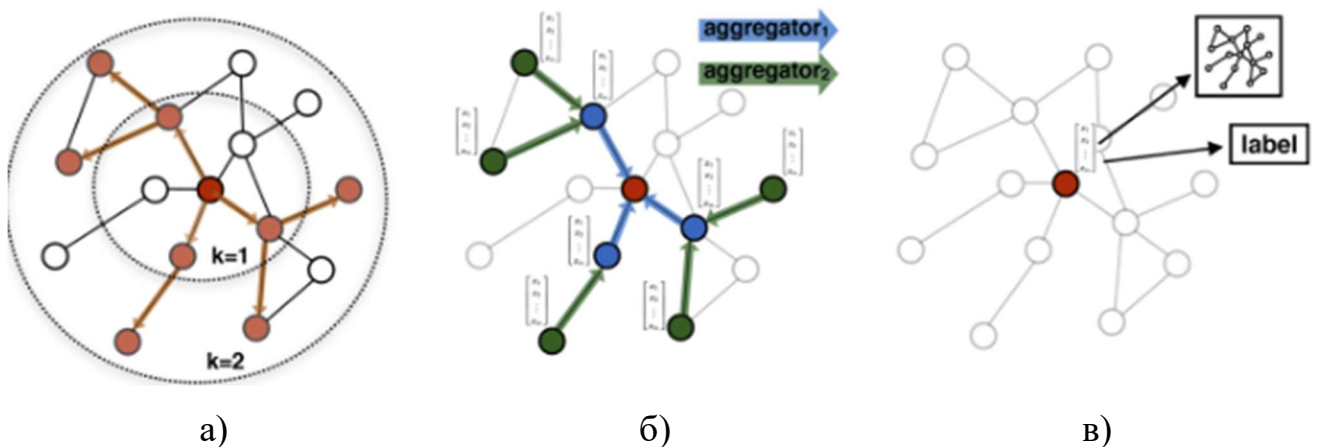


Рисунок 2.4 – Представление графа в вектор методом GraphSAGE: а – граф, б – процесс агрегации, в – присвоение локальной связи

Основным механизмом является выборка фиксированного числа соседей на каждом уровне и их последующая агрегация для построения нового представления вершины на следующем уровне. Векторное представление каждой вершины обновляется через обучаемую функцию, включающую веса соседних узлов и весовые коэффициенты связей. Алгоритм применим для различных задач, таких

как классификация узлов, прогнозированием связей и кластеризация, при этом поддерживает индуктивный подход, позволяя обучать модель на подмножествах графа и обобщать на новые, невидимые данные. Процесс агрегации может быть описан следующей формулой:

$$h_v^{(l+1)} = \sigma \left(W^{(l)} \cdot \text{AGGREGATE} \left(h_v^{(l)}, \{ h_u^{(l)}, \forall u \in N(v) \} \right) \right), \quad (2.4)$$

где $h_v^{(l)}$ – векторное представление вершины v на уровне l , $N(v)$ — множество соседей вершины v , $W^{(l)}$ – матрица весов на уровне l , и σ – функция активации.

Данный метод эффективен при обработке больших графов, так как использует подход выборочного семплирования, что позволяет избежать необходимости обработки всего графа целиком. Это снижает требования к памяти и вычислительным ресурсам. GraphSAGE обучается не на статичных графах, а в динамической среде, позволяя обновлять представления узлов по мере поступления новых данных, что делает его пригодным для обработки графов с изменяющейся структурой. Этот метод особенно полезен для задач, связанных с прогнозированием свойств узлов и ребер в крупных сетях (в том числе к обширным РЭМ со сложной топологией). Ещё одним важным аспектом является использование агрегации соседних узлов, которая помогает получить более богатое представление для каждого узла на основе его соседей, что улучшает качество прогнозирования.

2) Node2Vec – это алгоритм представления узлов графа в векторном пространстве, основанный на методе случайного блуждания. В отличие от методов, которые учитывают только непосредственные связи узлов, Node2Vec сохраняет как локальные, так и глобальные структурные свойства графа. Процесс включает генерацию последовательностей узлов через случайные блуждания по графу, а затем обучение векторных представлений с использованием методов, аналогичных Word2Vec (Skip-gram или CBOW). Алгоритм управляет параметрами p и q , которые контролируют склонность к глубинным и широким обходам, что

помогает балансировать между сохранением локальных и глобальных зависимостей.

$$Pr(u | v) = \frac{\exp(z_u \cdot z_v)}{\sum_{w \in V} \exp(z_w \cdot z_v)}, \quad (2.5)$$

где z_u и z_v — векторы представлений узлов u и v .

После блужданий по графу узлы кодируются в вектора с фиксированными размерами, что позволяет использовать их в задачах машинного обучения, таких как классификация узлов, прогнозирование связей и кластеризация. Node2Vec обеспечивает гибкость за счёт выбора между глубинным поиском (DFS), который подчеркивает локальные связи, и широким поиском (BFS), который сохраняет глобальные связи (рисунок 2.5).

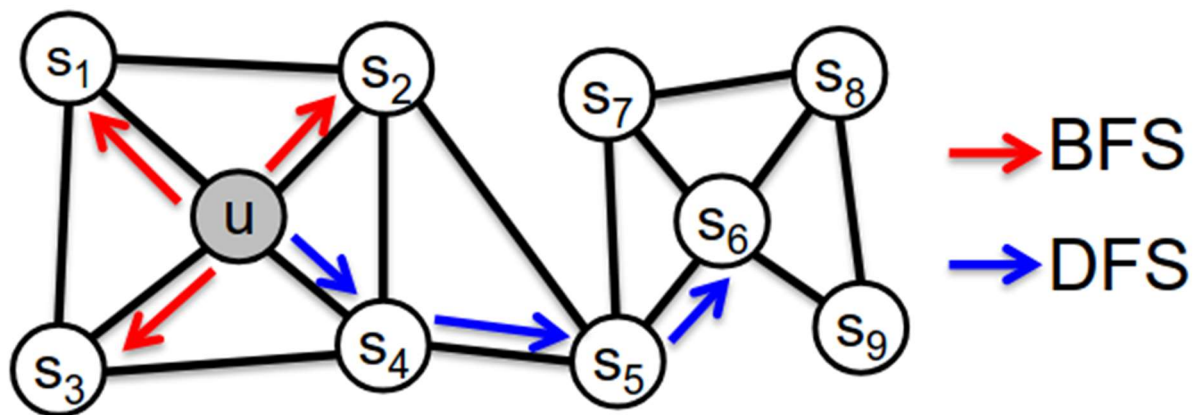


Рисунок 2.5 – Принцип случайных блужданий Node2Vec

Node2Vec фокусируется на эффективном создании векторных представлений узлов в графе, используя подходы из теории случайных блужданий. Его ключевое преимущество заключается в гибкости параметров, которые позволяют контролировать тип блуждания – можно усилить либо локальные, либо глобальные зависимости между узлами. Это делает Node2Vec полезным как для задач кластеризации, так и для классификации узлов. Он обеспечивает высокое качество представлений за счет оптимального баланса между исследованием узлов на большом расстоянии и углубленным анализом локальной структуры графа.

Node2Vec также хорошо справляется с задачами, где важно сохранять топологические и семантические зависимости между узлами.

3) Одним из вариантов обработки графа является использование сети Long Short-Term Memory (LSTM) – это разновидность рекуррентных нейронных сетей (РНН), разработанная для эффективного моделирования данных с длинными временными зависимостями. Обычные рекуррентные сети сталкиваются с проблемой "затухающих" или "взрывающихся" градиентов при обучении, что приводит к потере информации на дальних временных отрезках. LSTM решает эту проблему с помощью специальной архитектуры, включающей механизмы управления потоком информации через сеть.

LSTM состоит из набора ячеек, каждая из которых имеет три основные компонента: входной, выходной и забывающий элементы. Эти вентильные элементы позволяют модели сохранять, обновлять или удалять информацию на основе важности текущего контекста, что делает LSTM способной эффективно обрабатывать как краткосрочные, так и долгосрочные зависимости в данных. На рисунке 2.6 показано представление архитектуры [30, 31, 32].

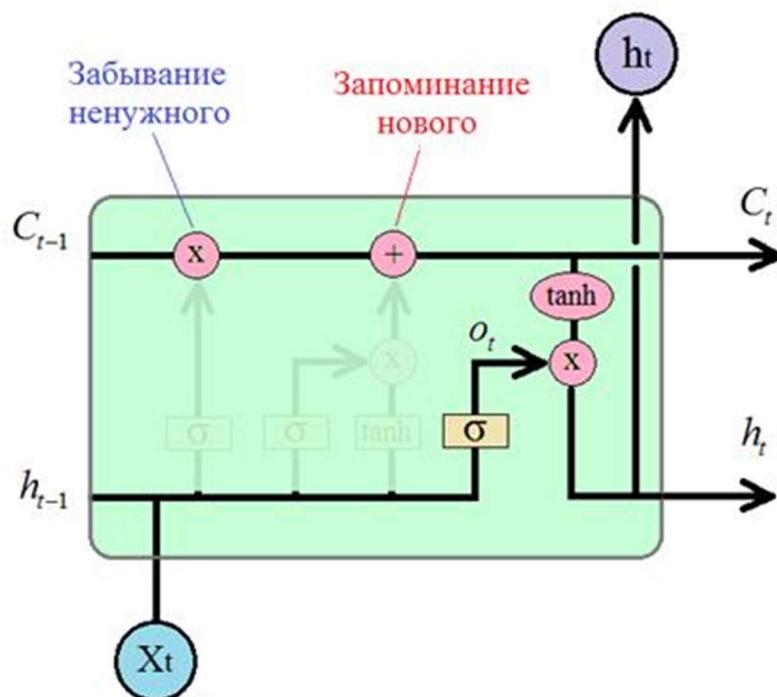


Рисунок 2.5 – Архитектура сети LSTM

Забывающий элемент решает, какую часть информации из предыдущего состояния нужно забыть. Формула для этого элемента выглядит так:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad (2.6)$$

где f_t – это вектор значений забывающего элемента, W_f – матрица весов для забывающего элемента, h_{t-1} – вектор состояния на предыдущем шаге, x_t – текущий входной вектор, а b_f – смещение.

Входной элемент управляет обновлением информации. Он решает, какие новые значения нужно добавить в состояние. Входной элемент обновляется следующим образом:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i), \quad (2.7)$$

где i_t – это вектор значений входного элемента, а W_i и b_i – матрица весов и смещение для входного вентиля.

Выходной элемент управляет выходом из ячейки, решая, какую часть информации из текущего состояния нужно передать на выход. Формула для выходного элемента:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), \quad (2.8)$$

где o_t – это вектор значений выходного элемента, а W_o и b_o – матрица весов и смещение для выходного элемента.

После того как LSTM решает, что забыть, что сохранить и что добавить, состояние ячейки обновляется:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t, \quad (2.9)$$

где C_t – новое состояние ячейки, f_t – значение забывающего элемента, C_{t-1} – предыдущее состояние ячейки, i_t – входной вентиль, а \tilde{C}_t , — новая информация, которая будет добавлена.

Итоговый выходной вектор описывается следующим выражением:

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (2.10)$$

где h_t – выходной вектор на текущем шаге, а C_t – текущее состояние ячейки.

Подход, используемый в LSTM принимает в качестве входных данных векторные представления информации. В связи с этим его использование применимо к задачам графового анализа возможно при условии предварительного преобразования данных. В задачах, связанных с графами, информация передаётся не только по временной оси, как в классических задачах LSTM, но и через сложную структуру взаимосвязей между узлами. Это создает дополнительные сложности для использования стандартных LSTM, поскольку графы не обладают линейной структурой, характерной для временных рядов или текстов.

Тем не менее, LSTM может эффективно работать с графами, если графовые данные предварительно преобразовать в векторные представления, например, с помощью таких методов, как Node2Vec или GraphSAGE. После преобразования графа в последовательность векторных представлений узлов, LSTM может использоваться для изучения зависимостей между узлами или прогнозирования их будущих состояний. При этом сеть может выявлять временные зависимости, скрытые в изменении состояния узлов или связей между ними. Преимущество использования LSTM в этом контексте заключается в том, что она сохраняет информацию о предыдущих узлах и их связях на протяжении всего процесса обучения, что может быть полезно при анализе сложных графов, особенно если данные графа изменяются со временем. Однако, такой подход будет являться вариацией ансамблевого обучения и приведет к усложнению архитектуры и возможной потере гибкости сети применимо к задачам другого рода [33].

4) Графовые сети внимания – это специализированная архитектура графовых нейронных сетей, которая использует механизм внимания для адаптивного взвешивания вклада соседних узлов в процессе агрегации информации. В стандартных ГНС все соседние узлы рассматриваются одинаково при обновлении представления узла. Однако в реальных графах не все соседние узлы одинаково важны для целевой задачи. ГСВ решают эту проблему, позволяя сети автоматически определять важность каждого соседа для узла, что делает процесс обновления более адаптивным и точным.

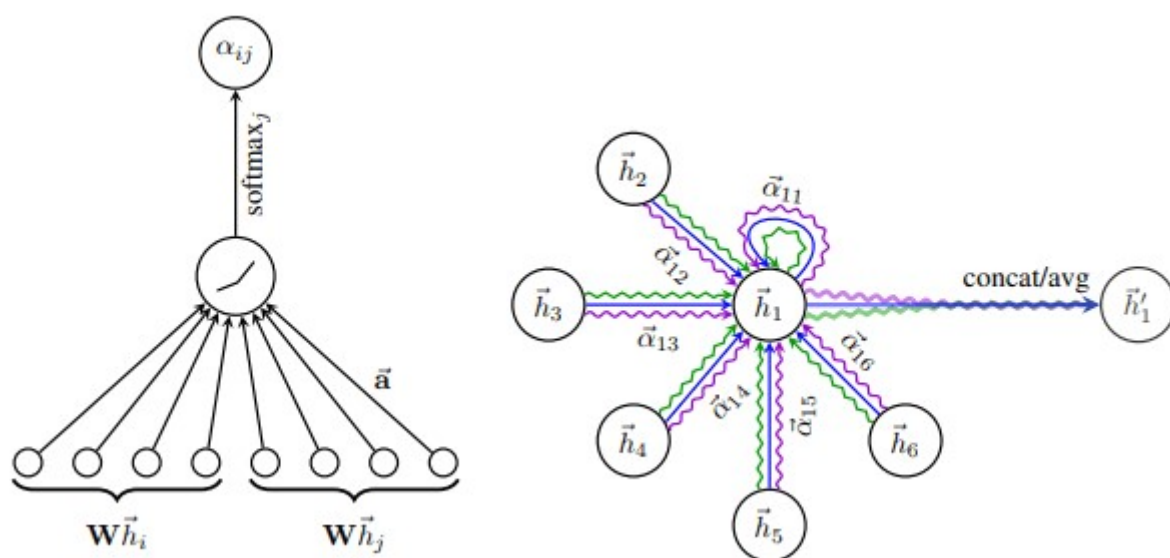


Рисунок 2.6 – Представление графовой сети внимания

Основная идея ГСВ заключается в том, что для каждого узла графа вычисляется коэффициент внимания, который определяет важность каждого его соседа. Этот коэффициент зависит от представлений узлов, а также от обучаемых параметров сети. Механизм внимания позволяет каждому узлу динамически определять, какой вклад каждый сосед должен внести в обновление его векторного представления. В отличие от стандартных методов агрегации, таких как усреднение или суммирование, внимание позволяет учитывать разную значимость информации, исходящей от соседей. Это особенно важно для задач, где структура графа и связи между узлами неравномерны и гетерогенны.

$$h_i^{(l)} = \sigma \left(\sum_{j \in N_i} \frac{1}{\sqrt{|N_i||N_j|}} W h_j \right) \quad (2.11)$$

Процесс обновления представления узлов в ГСВ происходит следующим образом. Для каждого узла и его соседей вычисляется «оценка внимания», которая отражает, насколько важен каждый сосед для данного узла. Эта оценка внимания основана на небольшой нейронной сети, которая принимает на вход представление узлов и вычисляет скалярное значение с помощью функции активации, такой как LeakyReLU. Оценки внимания затем нормализуются с помощью механизма softmax, что гарантирует, что сумма коэффициентов внимания для всех соседей равна единице. Это нормализованное значение используется для взвешенной агрегации информации от соседей, что позволяет узлу обновлять своё представление на основе наиболее релевантной информации.

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(\text{LeakyReLU}(a^T [Wh_i | Wh_j]))}{\sum_{k \in N(i)} \exp(\text{LeakyReLU}(a^T [Wh_i | Wh_k]))} \quad (2.12)$$

где a^T — вектор весов для внимания, W — матрица весов для линейного преобразования, h_i и h_j — векторные представления узлов.

Особенность ГСВ заключается в том, что она может присваивать различную степень важности (вес) для каждого соседнего узла (в данном случае — компонента), тем самым позволяя сети учитывать не только непосредственные связи между элементами, но и их влияние друг на друга через соседние компоненты. В условиях анализа воздействия внешних ЭМП на РЭМ это играет ключевую роль, так как компоненты могут обладать различной чувствительностью к ЭМП в зависимости от их положения и взаимосвязей с другими элементами цепи.

Использование механизма внимания в графовых сетях, применительно к радиоэлектронным модулям (РЭМ), устраняет необходимость в предварительном знании глобальной структуры графа, что делает ГСВ особенно подходящими для

работы с динамическими или частично известными схемами радиоэлектронных устройств. В контексте проектирования и анализа РЭМ связи между компонентами схем могут изменяться или уточняться в процессе разработки, и ГСВ способны адаптироваться к этим изменениям, определяя значимость новых или менее очевидных электрических соединений между компонентами в процессе обучения. Это особенно важно в условиях сложных взаимосвязей между элементами, таких как резонансные контуры или паразитные связи, которые могут существенно повлиять на ЭМС устройства.

С точки зрения математической формализации, ГСВ применяют линейные преобразования для каждого компонента схемы и его соседей, после чего механизм внимания взвешивает важность каждого соседнего компонента. Итоговое представление каждого узла (компонента схемы) – это взвешенная сумма преобразованных признаков соседних компонентов, нормализованная с помощью softmax. Этот процесс может быть выражен через несколько последовательных операций: сначала для каждого компонента и его соседей вычисляется коэффициент внимания, затем эти коэффициенты нормализуются, и, наконец, вычисляется итоговое представление компонента как взвешенная сумма его соседей. Это позволяет учитывать значимость отдельных элементов схемы в контексте их взаимодействий с другими элементами, что важно при анализе схем на устойчивость к электромагнитным помехам ЭМП.

Применение ГСВ к задачам анализа РЭМ включает широкий спектр задач, таких как оценка уязвимости узлов схемы, прогнозирование электрических связей, наиболее подверженных влиянию ЭМП, а также анализ чувствительности компонентов к воздействию электромагнитного поля. В задачах классификации узлов схемы ГСВ позволяют более точно учитывать влияние соседних компонентов на поведение системы, что особенно полезно при анализе сложных схем с различными типами компонентов и связей между ними. В задачах прогнозирования электрических помех ГСВ могут использоваться для оценки вероятности возникновения помех между двумя компонентами схемы, что важно для проектирования устойчивых к ЭМП систем.

Кроме того, ГСВ могут быть адаптированы для работы с различными типами схем, включая те, где соединения между компонентами имеют направленность или различную силу взаимодействий. Например, в схемах с высокочастотными модулями важно учитывать направленность и длину трассировки, так как эти факторы могут влиять на взаимодействие между компонентами. В контексте задач анализа динамических или изменяющихся схем ГСВ также демонстрируют высокую эффективность. Благодаря использованию механизма внимания, они могут адаптироваться к изменениям в схеме, например, к добавлению новых компонентов или изменений в трассировке. Использование механизма внимания в ГСВ позволяет учитывать сразу несколько аспектов схемы, таких как влияние резонансных контуров, паразитных индуктивностей или ёмкостей, что особенно важно при анализе сложных высокочастотных устройств.

Таким образом, использование графовых сетей внимания в задачах анализа РЭМ открывает новые возможности для эффективного проектирования и анализа сложных радиоэлектронных устройств с учётом воздействия ЭМП, позволяя прогнозировать критические компоненты и электрические связи, подверженные влиянию помех, и оптимизировать их конфигурацию на ранних стадиях проектирования.

Кроме того, ГСВ не требует точного знания глобальной структуры графа, что особенно важно при проектировании радиоэлектронных модулей, где схема может изменяться в процессе разработки. Благодаря этому механизму ГСВ является наиболее универсальной и мощной архитектурой для прогнозирования устойчивости РЭМ к ЭМП, обеспечивая высокую точность и адаптивность при минимальных требованиях к предварительной обработке данных.

2.3 Процесс преобразования печатной платы в граф

Процесс преобразования топологии печатной платы в граф для последующего анализа устойчивости к электромагнитным помехам с использованием ГСВ можно рассматривать как комплексный этап подготовки и

моделирования, где физическая структура платы и электрические соединения переводятся в математическую модель. В этом процессе ключевую роль играют проектные данные, включая netlist файл, содержащий информацию о схемных соединениях компонентов, pick and place файл, описывающий пространственные координаты каждого компонента на плате, и Gerber файлы, представляющие топологию проводников и контактных площадок. Для анализа был взят пример платы, эмитирующий трассировку длинной линии. На рисунке 2.7 представлена принципиальная схема устройства.

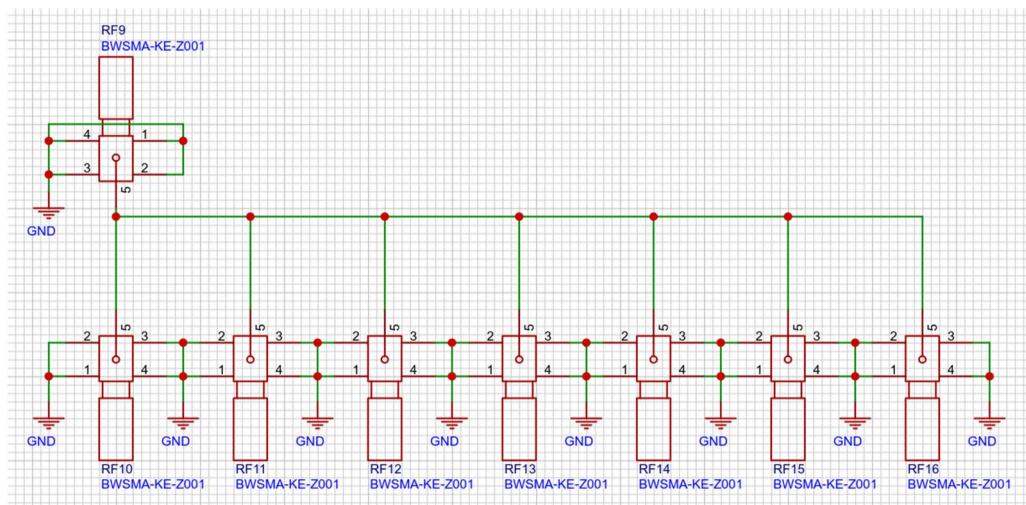


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема тестового устройства.

На данной схеме представлено устройство, которое предназначено для тестирования поведения длинной линии в зависимости от различных вариантов трассировки. Трассировка (3Д модель) данной схемы представлена на рисунках 2.8 (верхний слой) и 2.9 (нижний слой).

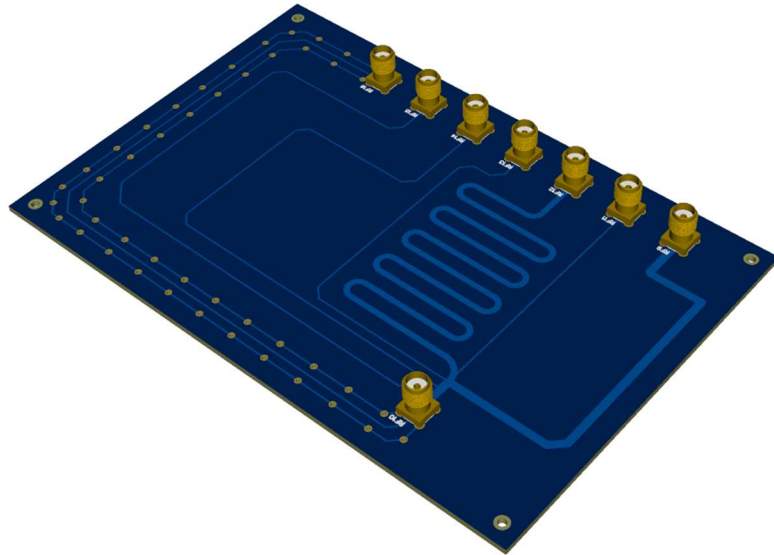


Рисунок 2.8 – Верхний слой тестовой платы

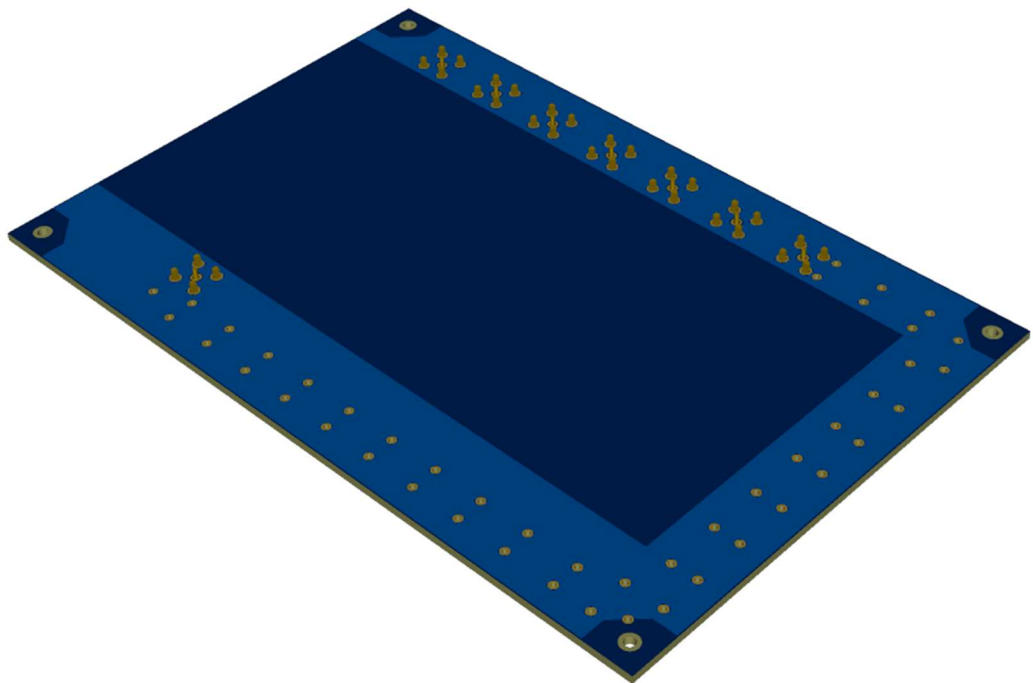


Рисунок 2.9 – Нижний слой тестовой платы

Для интерпретации данной платы в графовое представление были выполнены несколько шагов:

Для анализа была выбрана тестовая плата с длинной извилистой линией, что позволяет исследовать влияние различных вариантов трассировки на устойчивость сигнала. Преобразование этой платы в граф начинается с анализа netlist файла, где

электрические соединения между компонентами интерпретируются как узлы и ребра графа, что формирует электрическую топологию устройства. Далее pick and place файл предоставляет пространственные координаты компонентов, что позволяет учитывать физическое расположение элементов на плате при моделировании электромагнитных взаимодействий. Например, близко расположенные компоненты могут создавать взаимные электромагнитные наводки, влияя на общую помехоустойчивость.

После анализа исходных данных создается графовая модель платы. Каждый компонент на схеме представлен как узел графа, а электрические соединения между ними — как ребра. Пространственные координаты узлов играют важную роль, так как они обеспечивают точное отображение топологии платы, что позволяет оценить возможные наводки и взаимное влияние проводников на электромагнитные поля. Визуализация графа позволяет исследовать структуру устройства и выявить критические участки, подверженные наибольшему влиянию помех.

Граф, созданный на основе данных платы, включает информацию как о типах компонентов и их характеристиках, так и о типах соединений и их физической длине, что важно для анализа прохождения сигналов по длинным линиям. Далее этот граф подготавливается для обработки с помощью графовых нейронных сетей внимания, которые способны учесть сложные взаимосвязи между компонентами, их расположение на плате и электрические характеристики соединений.

Такой подход позволяет формализовать физическую структуру печатной платы, включая топологические и электрические особенности, и провести детальный анализ на помехоустойчивость.

На каждом узле и ребре графа могут быть заданы атрибуты. Узлы (компоненты) могут содержать информацию о типе компонента, его электрических параметрах (например, номинал, максимальная рабочая частота и т.д.), а также пространственные координаты. Ребра (сигнальные линии) могут содержать информацию о типе соединения (сигнальный, силовой, заземляющий), длине линии (вычисленной из координат) и другие данные, связанные с трассировкой. В

данном случае плата демонстрационная и дополнительных параметров для узлов не предусмотрено (поскольку они являются разъемами). Finalный вид получившегося графа представлен на рисунке 2.10.

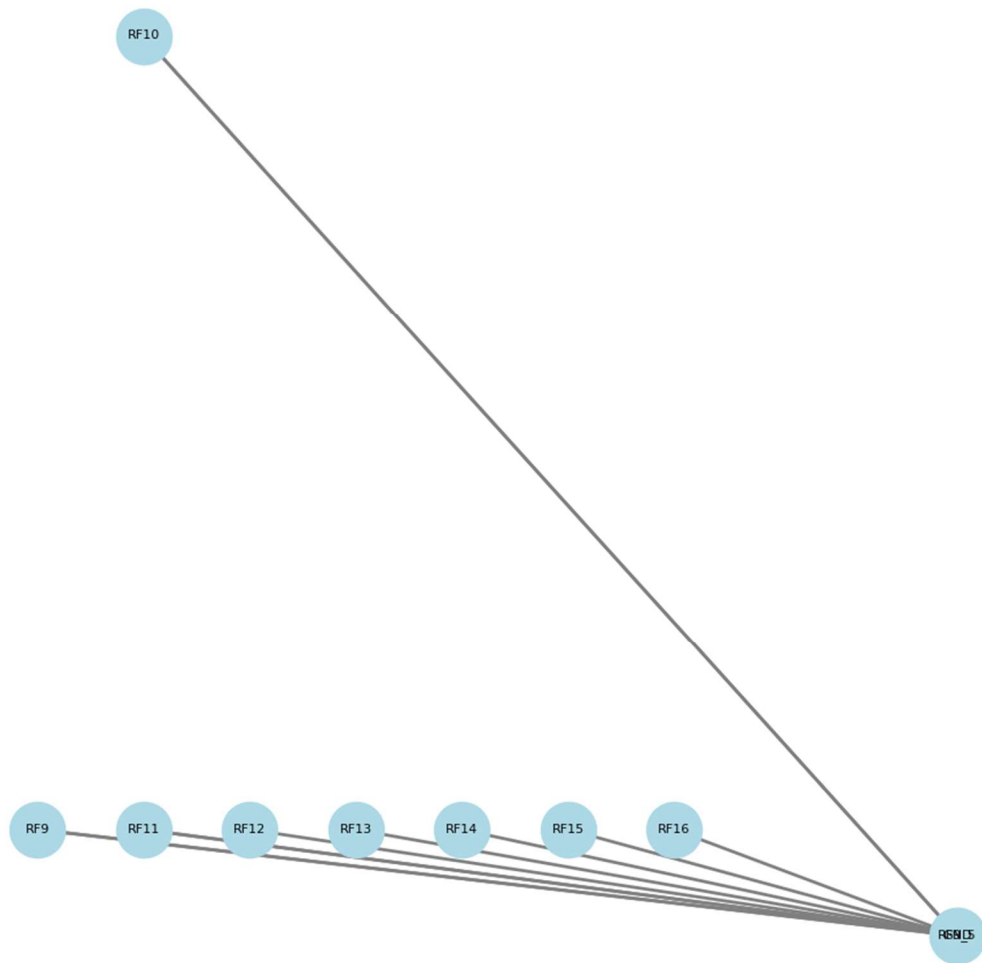


Рисунок 2.10 – Граф тестовой платы

Анализ графа, полученного на основе данных топологии платы, показывает, что большинство компонентов расположены на одинаковом расстоянии друг от друга, за исключением одного элемента, который выделяется своим удаленным положением. Это связано с тем, что компонент RF10 физически находится ближе к краю платы и соединен с компонентом RF9 через длинные высокочастотные линии. При этом RF10 не включен в основную цепь, которая связывает такие элементы, как RF11, RF12, RF13 и другие, что объясняет его обособленное положение на графе.

Извилистая высокочастотная линия, идущая от RF9, представляет собой одну из длинных трассировок, существенно влияющих на прохождение сигнала. Это и объясняет более тесную связь RF9 с другими компонентами на графе, тогда как RF10 выступает как изолированный элемент. Физическая топология платы и особенности электрических соединений четко отражены в графе: удаленность RF10 от других элементов обусловлена как его физическим положением, так и его подключением через отдельное соединение, не пересекающееся с основной цепью.

Таким образом, графовое представление платы точно сохраняет все ключевые особенности реальной топологии, что позволяет использовать его для дальнейшего анализа устойчивости к электромагнитным помехам. Графовые нейронные сети внимания могут эффективно выявлять наиболее уязвимые узлы, подверженные электромагнитным наводкам, моделируя влияние помех с учетом пространственного расположения и электрических характеристик. Это позволяет получить более детальное представление о взаимодействии компонентов платы и их уязвимости к помехам, что существенно повышает эффективность проектирования устойчивых РЭМ.

Процесс преобразования топологии платы в графовое представление занимает минимальное время, обеспечивая возможность быстрого анализа электромагнитной совместимости. Этот метод значительно ускоряет процесс анализа по сравнению с классическими математическими подходами, открывая возможности для применения современных методов машинного обучения, которые способны быстро и точно прогнозировать поведение сложных систем уже на стадии проектирования.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЭМП НА РЭМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В предыдущих главах были рассмотрены этапы преобразования топологии печатной платы в графовое представление и подготовка данных для последующего анализа. Уже выполнено структурирование этих данных для использования в ГНС, что позволяет более эффективно анализировать топологические и физические взаимодействия в РЭМ. Далее показано, как с помощью этого подхода возможно проводить детальный анализ устойчивости устройств к внешним электромагнитным возмущениям, выявлять критические узлы и рёбра, наиболее уязвимые к воздействию электромагнитных помех.

Графовое представление платы и её соединений послужило основой для создания датасета, на котором обучена нейросеть. В настоящей главе описывается разработанная методика, процесс создания графовых представлений компонентов и соединений, а также архитектура графовой нейронной сети и алгоритм её обучения. На основе графов были спрогнозированы критические зоны в топологии РЭМ, что позволило оценить вероятность успешного прохождения испытаний устройства на устойчивость к ЭМП.

Показаны также результаты моделирования и верификации с реальными данными, проведен расчет отклонений и ошибок прогнозирования сети.

3.1 Процесс создания датасета для обучения нейросети с графовыми представлениями компонентов и соединений.

Процесс создания датасета для обучения нейросети с графовыми представлениями компонентов и соединений радиоэлектронных модулей (РЭМ) включает в себя несколько ключевых этапов, каждый из которых играет важную роль в точности и эффективности прогнозирования модели. Датасет должен корректно отображать как физические, так и электрические характеристики устройства, чтобы нейросеть могла научиться идентифицировать критические

узлы, прогнозировать устойчивость к ЭМП и искать наиболее уязвимые места в конструкции на основе этих данных [33].

На начальном этапе производится сбор и предварительная обработка данных, согласно описанному в п.п. 2.3 способу. Данные собираются из схемотехнических и конструктивных файлов, таких как netlist (список соединений) и РСВ–файлы (печатная плата), что позволяет получить топологическую информацию о связях между компонентами. Физические параметры устройства, включая размеры проводников, расстояния между компонентами, материалы платы и заземляющие слои, также должны быть учтены. Эти данные впоследствии формируют основу для создания графовой структуры устройства (в таблице 3.1 приведен пример формы данных). Данная таблица показывает пример базовых данных, которые необходимо включить в датасет. Здесь указаны типы компонентов, их электрические параметры, координаты на печатной плате и электрические соединения.

Таблица 3.1 – Пример исходных данными о компонентах устройства:

Компоне нт	Тип	Знач ение	Коорди наты (x,y,z)	Соединени я	Индуктивн ость L	Емкос ть C
C1	Конденсатор	10 пФ	(10, 20, 1)	C2, R1	0	10 пФ
R1	Резистор	1 кОм	(15, 25, 1)	C1, L1	0	0
L1	Индуктивнос ть	1 мкГн	(20, 30, 1)	R1, IC1	1 мкГн	0
IC1	Микросхема	–	(25, 35, 1)	L1	–	–

Процесс создания датасета для обучения модели графовой нейронной сети с использованием различных вариантов конструкции радиоэлектронного модуля включает несколько ключевых этапов. Каждый этап требует тщательной проработки и включает моделирование, преобразование данных в графовую

структуру, разметку данных и обучение модели. Ниже приводится максимально полное и детализированное описание всего процесса, начиная с проектирования устройства и заканчивая верификацией обученной модели на основе моделирования или экспериментальных данных.

1) Создание различных вариантов изделия. Для того чтобы создать обучающий набор данных для нейронной сети, необходимо сформировать несколько вариантов изделия — как «правильных», так и «неправильных» с точки зрения трассировки и устойчивости к ЭМП. Эти варианты должны охватывать разнообразие возможных топологий устройства, чтобы модель смогла обучиться на разных типах данных и спрогнозировать потенциальные проблемы в новой конструкции.

Правильные варианты включают:

- Оптимально спроектированные трассировки, которые минимизируют наводки и резонансные эффекты.
- Платы с правильным расположением микросхем и других компонентов, с учетом минимальных индуктивных и емкостных связей.

Неправильные варианты:

- Устройства с длинными, неверной формы или слишком близко расположенными проводниками, вызывающими повышенные наводки.
- Платы с неправильным расположением экранирующих слоев или заземляющих проводников.

Для каждого варианта нужно будет выполнить моделирование электромагнитных характеристик с использованием таких инструментов, как CST Studio, для получения данных о полях и их влиянии на компоненты устройства.

2) Моделирование каждого варианта. На этом этапе проводится численное моделирование всех вариантов изделия. Моделирование включает расчеты электромагнитного поля, распределение напряженностей токов и индукций, а также возможные резонансные эффекты в системе.

Используя инструменты моделирования, такие как CST Studio, получают данные по следующим характеристикам:

- Электрическое поле E и его распределение по плате,
- Магнитное поле H и его распределение,
- Наводимые токи и напряжения на критически важных компонентах, таких как микросхемы.

Эти данные будут использоваться для построения графовой структуры устройства и разметки правильных и неправильных решений по каждому из вариантов.

3) Преобразование данных в графовую структуру. Для каждого варианта устройства необходимо преобразовать данные в графовый формат, чтобы нейронная сеть могла корректно интерпретировать топологию и взаимосвязи между элементами. Узлами графа будут выступать компоненты устройства, такие как микросхемы, резисторы, конденсаторы и линии передачи сигналов. Рёбра графа будут представлять электрические и физические связи между этими элементами, такие как проводники, земляные слои и трассировки.

Пример структуры графа:

- Узлы: микросхемы, конденсаторы, резисторы.
- Рёбра: физические и электрические соединения между узлами (трассировки, наводки, электрические контакты).
- Каждый узел будет содержать атрибуты:
 - Электрические параметры компонента (напряжение, ток, частота работы);
 - Координаты на плате;
 - Наводимые поля E и H в данной точке;
 - Информация о конструкции (слой, расположение относительно других компонентов).
- Рёбра также могут быть размечены следующим образом:
 - Наводки между компонентами (ёмкость и индуктивность между трассировками),
 - Длина трассировок (чем длиннее, тем выше вероятность возникновения помех).

4) Разметка данных. После создания графовой структуры для каждого варианта устройства необходимо разметить данные, чтобы обучить модель распознавать правильные и неправильные варианты. Разметка включает добавление меток, которые помогут нейросети различать корректные и некорректные конструкции.

Пример разметки:

- Варианты правильной трассировки могут быть помечены как «1» (удачный проект).
- Неправильные варианты трассировки — «0» (неудачный проект).

Кроме того, на каждом узле графа (например, на микросхеме) можно размечать величину наводимого поля E или H для каждого варианта трассировки. Это позволит обучить модель не только на структурных данных (например, расположение компонентов), но и на данных о физических параметрах (электрические поля, наводки).

$$Label_i = \begin{cases} 1, & \text{если } |E_i| < \text{порогового значения} \\ 0, & \text{если } |E_i| > \text{порогового значения} \end{cases} \quad (3.1)$$

Где E_i – наводимое электрическое поле на узле i , Пороговое значение — допустимый уровень наводимого поля для данного компонента.

Для отображения структуры датасета, который будет получен после выполнения шагов 1–4, можно представить его в виде таблицы, где каждый компонент устройства и его связи будут записаны в виде графа с размеченными характеристиками. Пример структуры датасета может выглядеть так, как показано в таблице 3.2 (пример основан на таблице 3.1).

Полученные данные могут быть использованы в процессе обучения нейронной сети. Сохранение большого количества подобных данных позволяет достичь лучших результатов по точности в процессе применения предобученной модели к различным вариантам топологии устройств.

Таблица 3.2 – Структура датасета

Узел (Компонент)	Тип Компонента	Координаты (x, y, z)	Соединения (Рёбра)	Наводимое Поле (E)	Наводимое Поле (H)	Метка (Правильность)
C1	Конденсатор	(10, 20, 1)	C2, R1	0.5 В/м	1.2 А/м	1 (правильный)
R1	Резистор	(15, 25, 1)	C1, L1	0.7 В/м	0.9 А/м	1 (правильный)
L1	Индуктивность	(20, 30, 1)	R1, IC1	0.9 В/м	1.5 А/м	0 (неправильный)
IC1	Микросхема	(25, 35, 1)	L1	1.2 В/м	2.0 А/м	0 (неправильный)

3.2 Описание архитектуры нейросети и алгоритма её обучения

При этом структура самой сети будет выглядеть следующим образом:

— Узлы в графе будут представлять компоненты (конденсаторы, резисторы и т.д.).

— Рёбра будут описывать электрические и физические соединения между узлами.

— Атрибуты узлов и рёбер будут включать информацию о физических характеристиках устройства, таких как индукция, напряженность полей и другие параметры.

В качестве архитектуры, наиболее подходящей для данной задачи, была выбрана ГСВ рассмотренная ранее.

Основные элементы архитектуры ГСВ:

1) Входные данные (граф):

– Узлы графа (компоненты устройства) содержат атрибуты, такие как координаты на плате, значения напряженности поля ЕЕЕ, ННН, номиналы компонентов (резисторы, конденсаторы и т.д.).

– Рёбра графа (соединения) содержат информацию о физических и электрических связях между узлами.

2) Веса рёбер:

– Веса рёбер могут быть рассчитаны на основе длины трассировки, индуктивности и ёмкости соединений между компонентами. Например, ребро, представляющее длинную трассировку, может иметь более высокий вес, что указывает на высокий риск возникновения наводок.

3) Механизм внимания:

– ГСВ использует механизм внимания, который позволяет узлам графа «решать», насколько важна информация от их соседей. Это делается через вычисление коэффициента внимания α_{ij} , который показывает, насколько сильно узел i должен учитывать информацию от соседнего узла j .

$$h_i(t + 1) = \sigma \left(\sum_{j \in N(i)} \alpha_{ij} W h_j(t) \right), \quad (3.2)$$

где $h_i^{(l)}$ – вектор признаков узла i на итерации t , α_{ij} – коэффициент внимания между узлами i и j , W – обучаемая матрица весов, $N(i)$ – множество соседей узла i , σ – нелинейная функция активации, например, ReLU.

Каждый узел обновляет свои признаки на основе информации, полученной от соседних узлов, взвешенной по важности с использованием коэффициентов внимания.

После графовых слоев сеть включает один или несколько полносвязных слоев для окончательного прогноза, также для предотвращения переобучения

используются Dropout слои, позволяющие пропустить некоторую часть весов модели на каждой итерации. Выход сети может быть либо бинарной классификацией (правильная/неправильная схема), либо регрессией, например, прогнозированием величины наводимого поля E или H на ключевых узлах графа (например, на микросхеме).

Структура сети подставлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Краткая структура ГСВ

Алгоритм обучения графовой нейронной сети для анализа РЭМ включает несколько ключевых шагов. Основная цель – минимизировать ошибку прогнозирования модели, улучшая способность сети прогнозировать устойчивость устройства к ЭМП. Этапы состоят из:

1. Инициализация весов. На первом этапе все веса сети инициализируются случайными значениями. Это касается как весов рёбер, так и параметров нейросетевых слоев, таких как матрица весов W в каждом графовом слое.

2. Прямое распространение. На каждом шаге данные о графе (узлы и рёбра) передаются через сеть. Каждый узел обновляет свои признаки на основе информации от соседей через графовые сверточные слои. Механизм внимания взвешивает важность каждого соседнего узла для обновления информации, позволяя сети учесть только наиболее важные связи.

3. Функция потерь. После каждого шага вычисляется функция потерь, которая определяет, насколько точно сеть прогнозировать целевые значения. В зависимости от задачи это может быть функция классификации или регрессии.

В качестве функции потерь используется следующая форма для наводимого поля:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\widehat{E}^i - E_i)^2, \quad (3.3)$$

где \widehat{E}^i – спрогнозированное значение наводимого поля для узла i , E_i – реальное значение наводимого поля, полученное из моделирования или измерений, N – количество узлов.

4. Обратное распространение ошибки. На этапе обратного распространения ошибка, вычисленная на предыдущем шаге, используется для коррекции весов в сети. Это делается с помощью алгоритма градиентного спуска, который минимизирует функцию потерь, корректируя веса нейросетевых слоев и коэффициенты внимания.

5. Обновление весов. На каждом шаге веса нейросети (веса рёбер и весовые параметры графовых слоев) обновляются в соответствии с градиентами, вычисленными на предыдущем шаге. Это продолжается до тех пор, пока функция потерь не перестанет существенно уменьшаться или пока не будет достигнуто заранее определенное количество итераций.

6. Верификация результатов. После завершения обучения сеть тестируется на данных, которые не были использованы для обучения. Это позволяет убедиться в том, что сеть способна прогнозировать поведение

устройства в условиях воздействия ЭМП не только на обучающих данных, но и на новых, ранее не виденных ей вариантах конструкции.

Для оптимизации сети в процессе обучения используются следующие техники:

— Dropout – исключение случайных узлов или рёбер на этапе обучения для предотвращения переобучения.

— Регуляризация – добавление штрафов в функцию потерь для предотвращения слишком сильной зависимости от определенных рёбер.

— Энсемблирование – объединение нескольких моделей нейросетей для повышения точности прогнозирования.

Создание и обучение сети проводится с использованием языка программирования python, процесс обучения представлен на рисунке 3.2.

```
Epoch 284/300  
2/2 [=====] - 1s 538ms/step - loss: 0.0492 - sparse_categorical_accuracy: 0.9858  
Epoch 285/300  
2/2 [=====] - 1s 495ms/step - loss: 0.0461 - sparse_categorical_accuracy: 0.9859  
Epoch 286/300  
2/2 [=====] - 1s 498ms/step - loss: 0.0441 - sparse_categorical_accuracy: 0.9860  
Epoch 287/300  
2/2 [=====] - 1s 487ms/step - loss: 0.1669 - sparse_categorical_accuracy: 0.9339  
Epoch 288/300  
2/2 [=====] - 1s 486ms/step - loss: 0.0440 - sparse_categorical_accuracy: 0.9860  
Epoch 289/300
```

Рисунок 3.2 – Процесс обучения нейронной сети

После окончания обучения параметры модели (весовые коэффициенты) сохраняются в виде массива чисел и могут быть использованы при проведении дообучения в качестве начальных данных и в качестве основы для составления прогнозов моделью при её прямом использовании при анализе.

3.3 Описание методики анализа влияния ЭМП с использованием графовых нейронных сетей.

Методика анализа влияния ЭМП на РЭМ с использованием ГНС базируется на построении математической модели устройства, основанной на его топологической структуре. Основной подход заключается в преобразовании

физической топологии устройства в граф, где узлы графа представляют компоненты РЭМ, а рёбра – электрические и физические связи между ними. Этот граф включает в себя не только электрические соединения, такие как трассировки и соединительные кабели, но и физическое расположение компонентов, что позволяет учитывать пространственные и электромагнитные взаимодействия между элементами устройства.

Каждый узел графа несет информацию о физических и электрических параметрах компонента: номинальные значения, емкость, индуктивность, рабочие частоты, параметры помехозащищенности и устойчивости к наводкам. Рёбра графа содержат информацию о типе связи между узлами: это может быть, как стандартное соединение через проводник, так и индуктивные или емкостные наводки, возникающие между физически близкими компонентами. Такие наводки особенно значимы при высоких частотах и в условиях сильного электромагнитного воздействия.

На рисунке 3.3 представлена структурная схема разработанной методики.

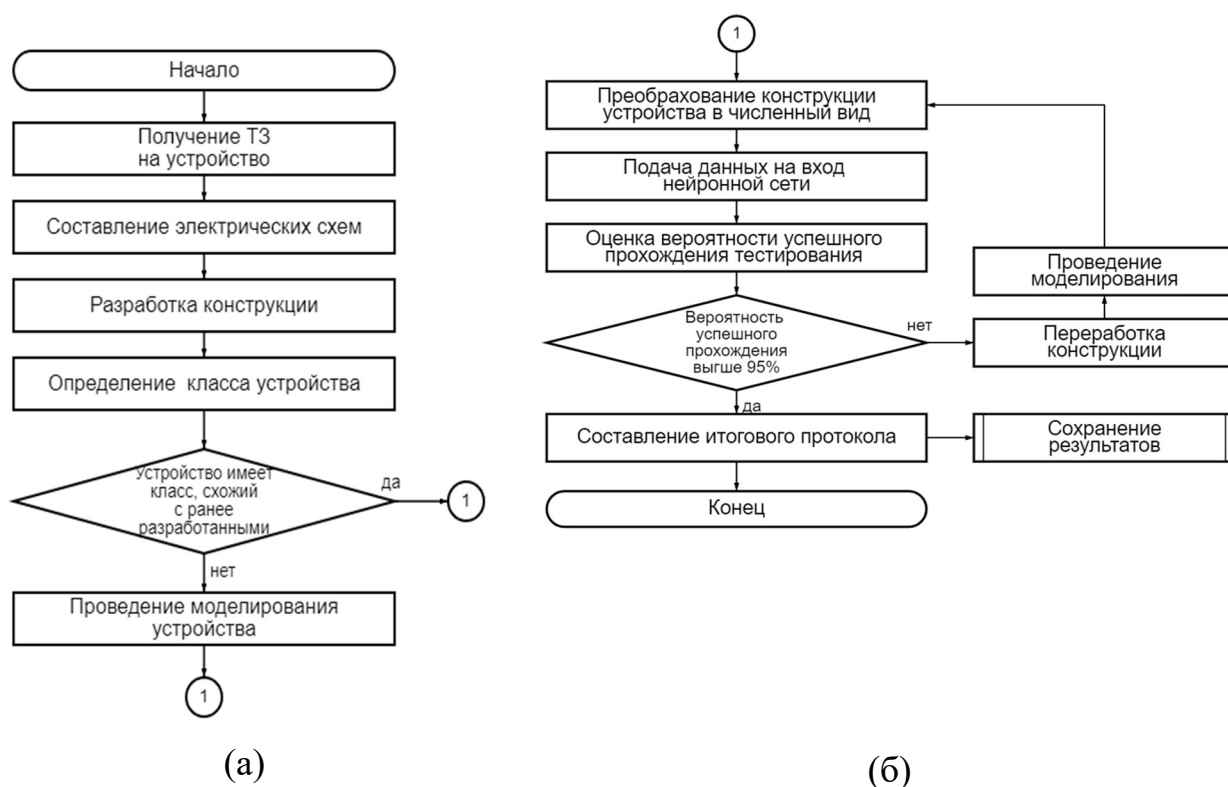


Рисунок 3.3 – Структурная схема методики анализа влияния ЭМП на РЭМ:

а – этап проектирования, б – этап анализа.

В основе предложенной методики анализа устойчивости РЭМ к ЭМП лежит интеграция численного моделирования и нейросетевых методов прогнозирования. Процесс начинается с получения технического задания (ТЗ) на разработку устройства, что является отправной точкой для формирования электрических схем и разработки конструкции. Эти схемы отражают топологию устройства и позволяют на первом этапе выполнить классификацию устройства на основе аналогичных ранее разработанных систем. Если устройство принадлежит к категории уже существующих и протестированных систем, его моделирование значительно упрощается за счет использования накопленного опыта и готовых данных [33, 34, 35, 36].

Если же устройство относится к новому классу, процесс начинается с нуля, с использованием методик моделирования. Это позволяет провести первичное численное моделирование устройства с учетом предполагаемых рабочих частот и внешних воздействий. На этом этапе важно учесть как схемотехнические, так и конструктивные особенности, которые могут оказать влияние на результат моделирования.

После проведения численного моделирования устройство преобразуется в численную модель, которая передается на вход графовой нейронной сети. На этом этапе нейросеть использует входные данные, такие как параметры электрических цепей, их физические характеристики, расположение компонентов и результаты моделирования полей. Графовая структура данных позволяет учесть топологию устройства и взаимосвязи между элементами. Это дает возможность сети оценить степень воздействия электромагнитных помех на устройство, учитывая не только электрические соединения, но и их физическое расположение на плате, а также длину и форму проводников, которые могут быть приемниками помех.

Результаты численного моделирования экспортируются в табличном виде и имеют структуру, показанную на рисунке 3.4.

x [mm]	y [mm]	z [mm]	HxRe [A/m]	HxIm [A/m]
-0.012700025	98.997233	0.26667138	0.0026807967	-7.5839838e-05
-0.47991061	99.987297	0.80001414	0.0026606275	9.9050674e-05
-0.012700025	99.517934	0.80001414	0.0026680678	9.3993498e-05
-0.40325888	99.466596	1.6000283	0.0026609371	0.0003495242
-0.012700025	98.997233	1.3333569	0.0026728078	0.00025604918
-0.012700025	97.486465	1.3333569	0.0026967274	0.00026222831

Рисунок 3.4 – Табличное представление результатов моделирования устройства в CST Studio

Данная структура представляет собой распределение H-поля на поверхности исследуемого изделия при воздействии на него помехой с гауссовым распределением на частоте 3,75 ГГц (рисунок 3.5).

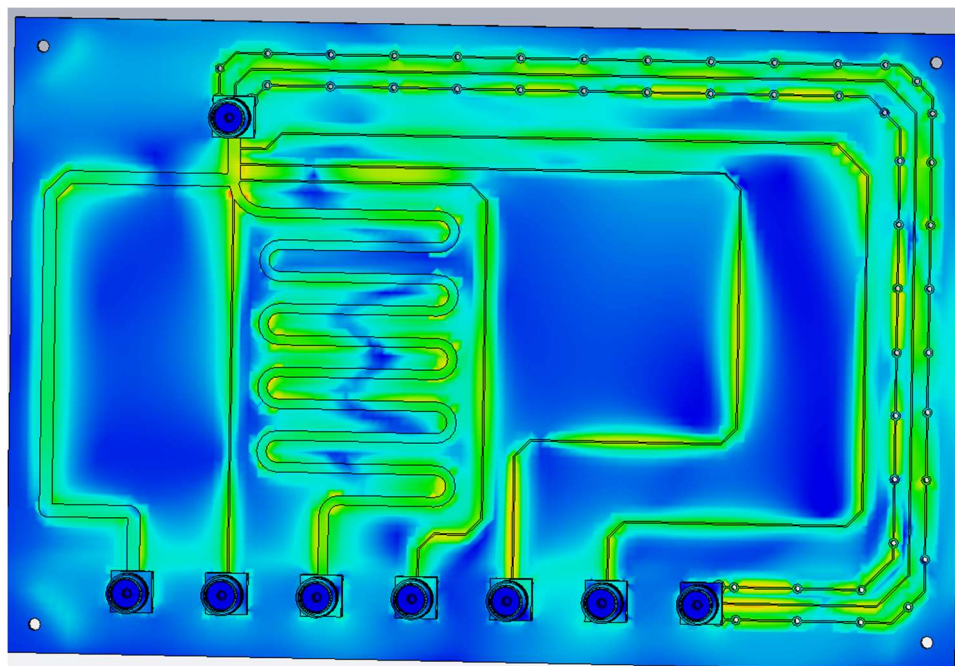


Рисунок 3.5 – Результаты моделирования тестового устройства.

Далее эти результаты перерабатываются из таблицы в графовую форму и используются при дальнейшем анализе устройства с применением ГНС.

На основании этих данных нейросеть прогнозировать вероятность успешного прохождения устройства через испытания на устойчивость к ЭМП. Если вероятность выше 95%, то процесс считается завершенным и устройство готово к тестированию. Однако, если вероятность не достигает этого порога,

конструкция устройства дорабатывается с учетом прогнозов нейросети, и процесс моделирования повторяется. Этот итеративный процесс позволяет оптимизировать конструкцию до тех пор, пока устройство не станет достаточно устойчивым к внешним электромагнитным воздействиям [37, 38, 39].

Основным отличием и преимуществом предложенной методики относительно существующих является использование ГНС в качестве замены математической модели расчёта устройства. Данный подход значительно сокращает время, необходимое на предварительную оценку качества проектирования. Однозначно, на данном этапе ввиду малого объема обучающих данных и необходимости постоянного дообучения сети необходимо использовать ГНС параллельно классическому способу моделирования. Однако, в случае сбора большого количества данных для различных классов устройств ГНС достигнет достаточного уровня для повышения качества работы. Поскольку ГНС способны обеспечить быстрое решение в различных случаях и для различных проектируемых РЭМ:

– В РЭМ на высоких частотах (особенно в диапазоне от сотен мегагерц до нескольких гигагерц) начинают доминировать такие факторы, как паразитные емкости и индуктивности. Эти параметры зачастую трудно учесть при традиционном проектировании, но именно они оказывают ключевое влияние на устойчивость устройства к ЭМП. Графовые нейронные сети позволяют более точно учитывать сложные взаимодействия, которые возникают на уровне высокочастотных цепей. Например, на высоких частотах каждый проводник и его физическое окружение могут действовать как антенна, излучая и принимая электромагнитную энергию. Такая «антенная» активность проводников может вызвать нежелательные наводки на соседние цепи, что ведет к сбоям в работе устройства. ГНС способна интегрировать данные о физических и электрических параметрах проводников, таких как длина трассировки, ее форма и расстояние до соседних цепей, для прогнозирования возможных наводок. Кроме того, на высоких частотах даже небольшие изменения в длине или форме проводников могут значительно изменить их импеданс. Это важно для передачи сигналов с

минимальными потерями. Например, неправильно рассчитанная длина линии передачи может привести к стоячим волнам и резонансным явлениям, что в свою очередь вызывает значительные наводки. Предобученная нейронная сеть в состоянии определить влияние того или иного способа трассировки на результирующее поведение проводников на печатной плате при внешнем воздействии ЭМП.

– Физическая структура устройства также играет важную роль в устойчивости к ЭМП. Радиоэлектронные модули, как правило, содержат несколько слоев проводников, расположенных на печатной плате. Эти слои могут взаимодействовать друг с другом через межслойные емкости, особенно если отсутствует достаточное экранирование. ГНС позволяют моделировать такие многослойные системы, где узлы графа могут представлять не только компоненты, но и участки проводников на разных слоях. Особое внимание уделяется эффектам распространения электромагнитных волн через корпус устройства. В условиях, когда устройство подвергается воздействию внешних ЭМП, корпус может действовать как экран, но если он неправильно спроектирован, он может также выступать в роли проводника наводок внутрь устройства. В методике анализа на основе ГНС каждый элемент конструкции, включая корпус, экраны и другие механические части, может быть представлен в графе как узел, связанный с остальными компонентами устройства через рёбра, которые моделируют электромагнитные взаимодействия между ними. Такой подход позволяет учитывать сложные пространственные зависимости. Например, корпус устройства может не блокировать высокочастотные сигналы, что приводит к проникновению помех и индуцированию токов на печатной плате. ГНС, обученная на данных об электромагнитных характеристиках корпусов и конструктивных элементов, может спрогнозировать такие явления и предложить корректировки в конструкции — например, добавление экранирующих слоев, изменение геометрии корпуса или замена материала корпуса на лучше экранирующий.

– Радиоэлектронные устройства, работающие на высоких частотах, часто используют микрополосковые линии для передачи сигналов. Эти линии являются

критически важными элементами в конструкции, так как их параметры сильно зависят от геометрии и электрических свойств материалов платы. На высоких частотах сопротивление микрополосковой линии, ее длина, ширина и расстояние до заземляющего слоя играют ключевую роль в передаче сигнала с минимальными потерями. Использование графовых нейронных сетей в этой части анализа позволяет учесть все эти параметры одновременно. Узлы графа могут представлять сегменты микрополосковой линии, а рёбра – связи между этими сегментами и остальными частями устройства. Это позволяет точно смоделировать распределение сигнала вдоль линии, а также учесть влияние внешних ЭМП на передачу сигнала по этим линиям. Например, сеть может прогнозировать, на каких участках микрополосковой линии возникнут наибольшие потери сигнала из-за наводок или резонансных эффектов, и предложить соответствующие изменения в геометрии или конструкции линии.

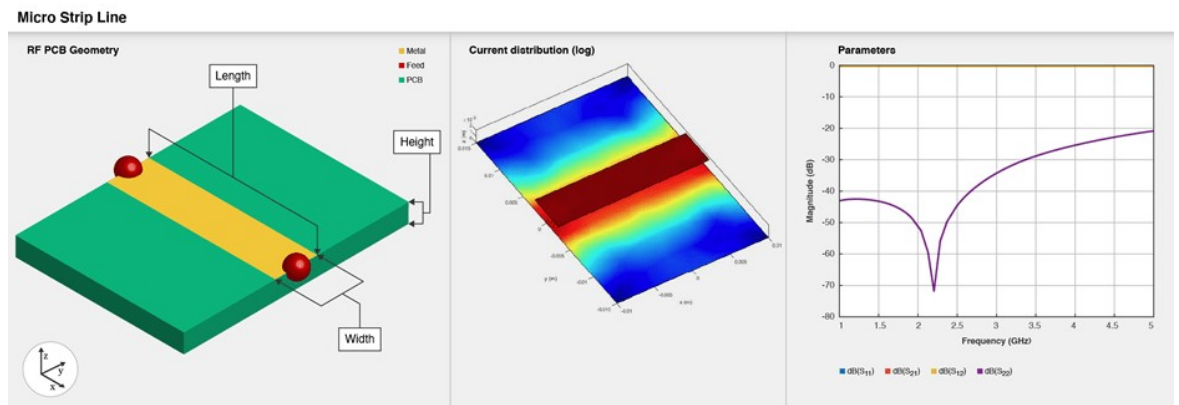


Рисунок 3.6 – Внешний вид микрополосковой линии

– Резонансные явления на высоких частотах могут стать серьезной проблемой для РЭМ. В условиях воздействия внешних ЭМП система может войти в резонанс, что приведет к значительному усилению наводок и, как следствие, к сбоям в работе. Графовые нейронные сети позволяют учесть нелинейные резонансные эффекты, которые возникают в высокочастотных цепях. Это достигается путем интеграции данных о распределении поля и параметрах цепей, таких как индуктивности, емкости и длины проводников. Например, если

проводник в устройстве имеет длину, которая является кратной половине длины волны падающего сигнала, это может вызвать резонанс, усиливающий наводки. ГНС могут выявить такие риски и предложить способы их устранения, такие как изменение длины трассировок, добавление фильтров или использование экранирования для подавления резонансных эффектов.

– В радиотехнических устройствах, включающих приемные антенны, важнейшим аспектом анализа является оценка воздействия внешних электромагнитных помех на чувствительность антенны. Антенна, являясь основной точкой приема сигнала, наиболее подвержена внешним наводкам, особенно если она работает на высоких частотах. Графовые нейронные сети позволяют анализировать, как внешние помехи влияют на работу антенны, моделируя как физические параметры антенны (например, длину и форму), так и расположение относительно других элементов системы. Сеть может оценить, как помехи, индуцированные на компонентах, близких к антенне, могут влиять на ее рабочие характеристики. Это особенно актуально для антенн, расположенных в корпусе устройства, где наводки могут усиливаться за счет многократных отражений сигналов внутри корпуса. ГНС позволяет моделировать такие сложные взаимодействия и предлагать способы экранирования или изменения компоновки антенн для улучшения помехозащищенности.

Таким образом, использование графовых нейронных сетей в анализе радиоэлектронных устройств открывает возможности для более точного и детализированного учета высокочастотных радиотехнических эффектов, таких как паразитные индуктивности, емкости, резонансные явления и влияние внешних электромагнитных помех на чувствительные элементы устройства. Этот подход позволяет интегрировать численное моделирование с глубоким обучением, предоставляя мощный инструмент для оптимизации конструкции устройств и повышения их устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Экспериментальное исследование направлено на проверку предложенной методики анализа воздействия электромагнитных помех на радиоэлектронные модули с использованием нейронных сетей. В качестве тестового объекта был выбран радиоэлектронный модуль с заранее известными характеристиками, созданный на базе современных инженерных инструментов для анализа схем и электрических характеристик.

Для проведения эксперимента использовались расчетные модели в формате CST Studio и Advanced design system (ADS), которые обеспечивают трехмерное электромагнитное моделирование. CST позволяет точно рассчитывать электромагнитные поля в сложных радиоэлектронных модулях. Эти модели были дополнены данными Gerber, P&P и netlist — основными файлами, которые используются для описания топологии печатных плат, их компонентов и схемных соединений.

4.1 Описание тестового радиоэлектронного модуля

С целью проведения оценки работоспособности разработанной методики был разработан тестовый радиоэлектронный модуль (рисунок 4.1). Тестовый радиоэлектронный модуль, представленный на рисунке, является печатной платой, основная цель которой — демонстрация влияния внешнего электромагнитного поля на электрические параметры различных типов дорожек и конфигураций соединений. Плата предназначена для оценки работы устройства в условиях внешнего электромагнитного воздействия и анализа уязвимости трассировок к наводкам, что позволяет оценить резонансные и другие эффекты, которые могут привести к сбоям в работе РЭМ [40].



Рисунок 4.1 – Разработанный тестовый РЭМ

Основные характеристики платы:

1. Плата имеет общий входной порт, к которому подаётся сигнал, и несколько выходных портов, каждый из которых связан с отдельной дорожкой или группой дорожек, представляющих различные конфигурации трассировки. Эти выходные порты позволяют сравнивать результаты для разных вариантов трассировок и оценивать их влияние на параметры сигнала при воздействии электромагнитного поля.

2. На плате присутствуют несколько трассировок, каждая из которых имеет разные параметры, такие как длина, ширина, форма и количество поворотов. Эти трассировки моделируют разные варианты исполнения дорожек, используемых в реальных радиоэлектронных модулях. Некоторые дорожки имеют извилистую форму, другие – прямую. Цель – протестировать, как каждая трассировка ведет себя под воздействием внешнего электромагнитного поля и насколько она подвержена резонансным и наводимым эффектам.

3. Предполагается, что внешнее воздействие на плату будет моделироваться электромагнитным полем в диапазоне частот от 700 МГц до 7000 МГц. Это поле воздействует на трассировки и компоненты платы, вызывая наводки

в цепях. Основная задача эксперимента – оценить, как это внешнее поле влияет на сигналы, проходящие по каждой из трассировок, и выявить критические дорожки, где возникает наибольшее усиление или искажение сигнала.

4. После подачи сигнала на входной порт результаты с каждого выхода будут анализироваться. Ожидается, что резонансные или иные эффекты на отдельных дорожках могут привести к значительным изменениям тока и напряжения, что может привести к сбоям в работе устройства. Например, извилистые дорожки могут проявлять резонансные эффекты при определённых частотах внешнего поля, что усилит наводки и вызовет неправильную работу устройства.

5. Плата разработана как учебный и демонстрационный модуль, который позволяет проводить контролируемые эксперименты по воздействию ЭМП на печатные платы с различными типами трассировок. Она помогает исследовать критические факторы, влияющие на наводки и сбои в работе РЭМ, такие как длина, форма и расположение дорожек, а также взаимодействие трассировок с внешними электромагнитными полями.

С целью полноценной оценки в соответствии с методикой было проведено моделирование устройства в CST Studio на различных частотах.

4.2 Моделирование тестового РЭМ в CST Studio

Моделирование устройства с целью оценки его устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям в CST Studio является ключевым этапом эксперимента, направленного на выявление критических узлов и трассировок печатной платы, подверженных резонансным явлениям и усилению наводок. В данном случае используется диапазон частот от 700 МГц до 7000 МГц с шагом в 500 МГц. Плоская электромагнитная волна с линейной поляризацией и гауссовым шумом воздействует на устройство, и для каждой частоты исследуются наводимые токи и напряжения в узловых точках платы. На рисунке 4.2 изображена трехмерная модель платы, загруженная в CST.

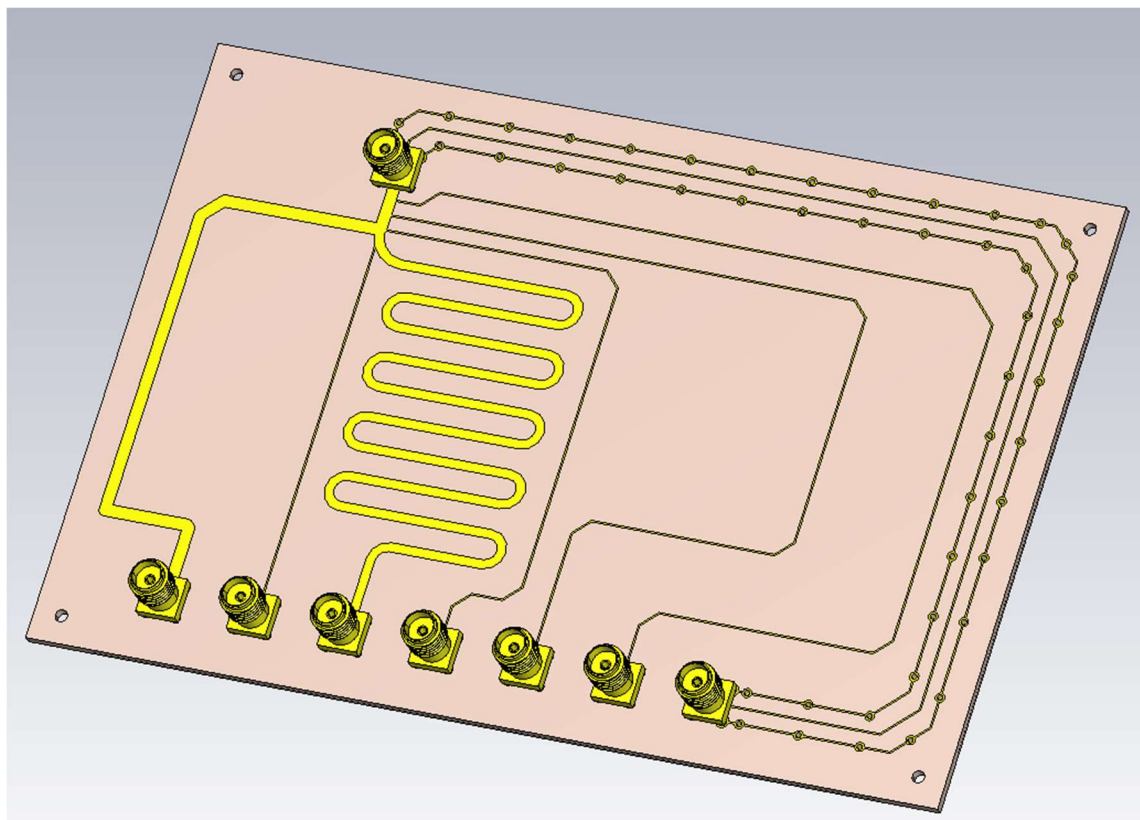


Рисунок 4.2 – Внешний вид тестового РЭМ

Настройки внешнего воздействия были заданы с использованием плоской волны с направлением распространения вдоль оси z и электрического поля, ориентированного вдоль оси y . Это решение позволяет равномерно воздействовать на всю поверхность платы, имитируя реальные условия воздействия электромагнитных помех. Использование линейной поляризации в моделировании особенно важно для исследования реальных условий, при которых радиоэлектронные модули могут подвергаться различным типам помех в рабочей среде. Параметры волн, такие как частота 3.85 ГГц, фазовая разность в -90 градусов и линейная поляризация, позволяют создать идеальные условия для исследования влияния внешних полей на плату.

Устройство, моделируемое в CST Studio, включает несколько трассировок различной длины и формы. Эти дорожки были выбраны для того, чтобы выявить, какие из них наиболее подвержены наводкам при различных частотах внешнего поля. Исследуются как длинные прямые трассировки, так и извилистые дорожки, каждая из которых обладает своими характеристиками и реакцией на внешнее

воздействие. Особый интерес вызывает поведение извилистых трассировок, которые, как предполагается, могут проявить резонансные эффекты при определённых частотах.

На частоте 700 МГц, изображение показывает распределение токов по дорожкам устройства. Видно, что на этой частоте интенсивность наводимых токов относительно низкая. Максимальная плотность тока наблюдается на отдельных длинных дорожках, что соответствует естественному поведению устройства на низких частотах. Визуально отображены более слабые токи, что подтверждается плавным распределением по всей плате (рисунок 4.3).

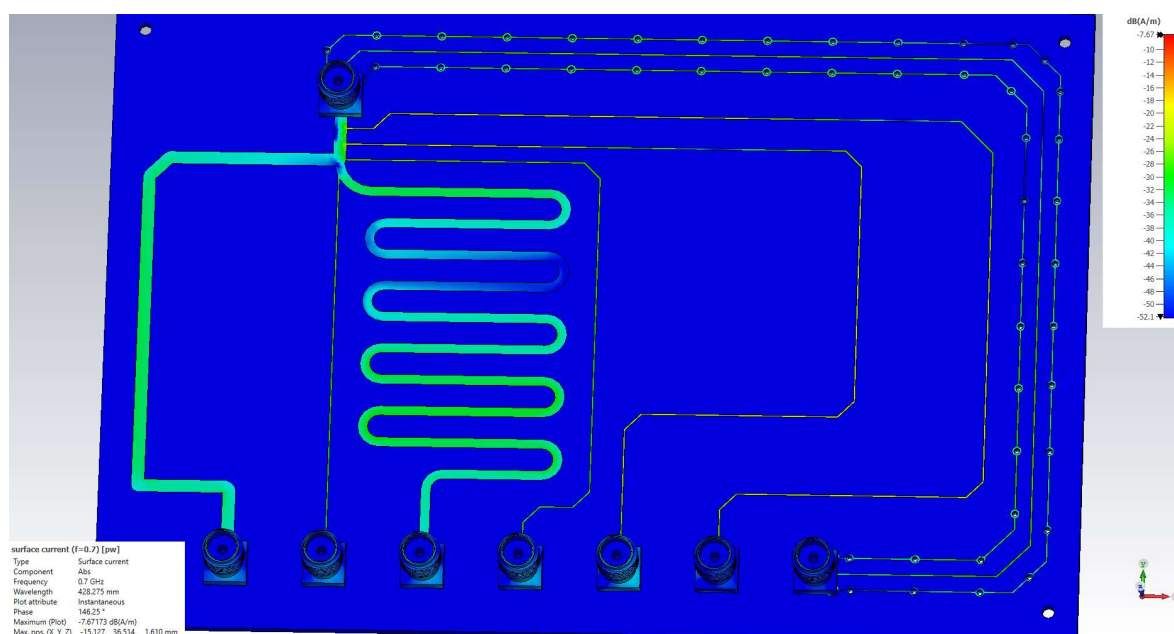


Рисунок 4.3 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 700 МГц

На частоте 1500 МГц наблюдается усиление наводимых токов на длинных и извилистых трассировках. Это связано с увеличением частоты, что приводит к более выраженным резонансным эффектам в длинных дорожках. Видно усиление токов в критических точках платы (рисунок 4.4).

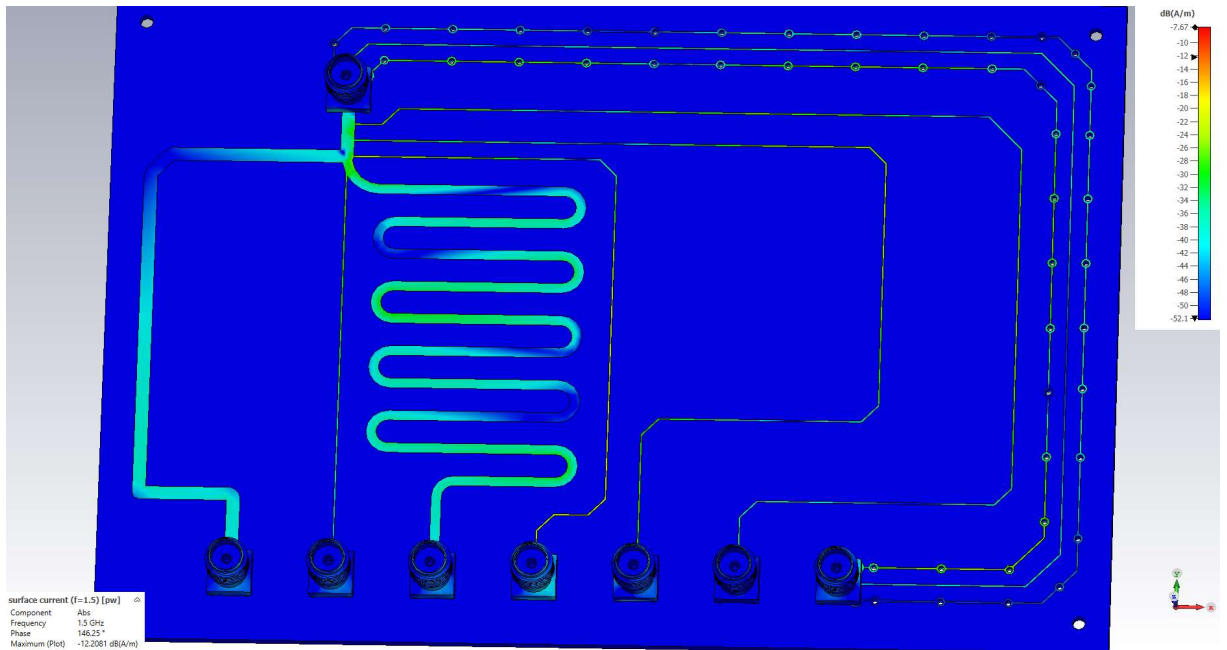


Рисунок 4.4 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 1500 МГц

При частоте 2250 МГц резонансные эффекты становятся более заметными, особенно в изогнутых участках дорожек. Это подтверждается интенсивными цветовыми зонами на изображении, указывающими на усиленные токи, что может привести к нежелательным эффектам, таким как искажения сигнала или перегрев элементов (рисунок 4.5).

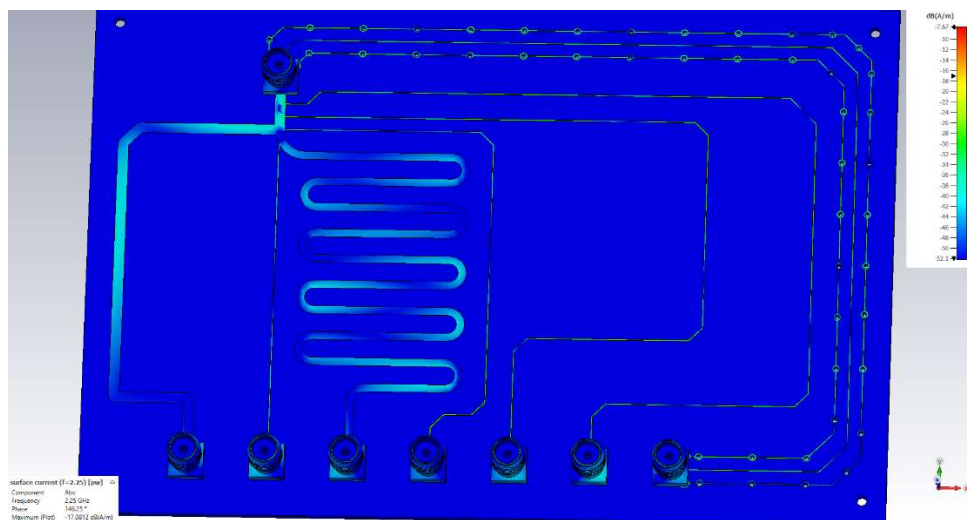


Рисунок 4.5 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 2250 МГц

На частоте 3000 МГц устройство демонстрирует значительное увеличение наводок в центральной части дорожек. Резонансные явления становятся более очевидными, и максимальные токи наблюдаются в зоне с наибольшей длиной дорожки. Эти результаты предполагают необходимость коррекции компоновки дорожек для снижения резонансных явлений (рисунок 4.6).

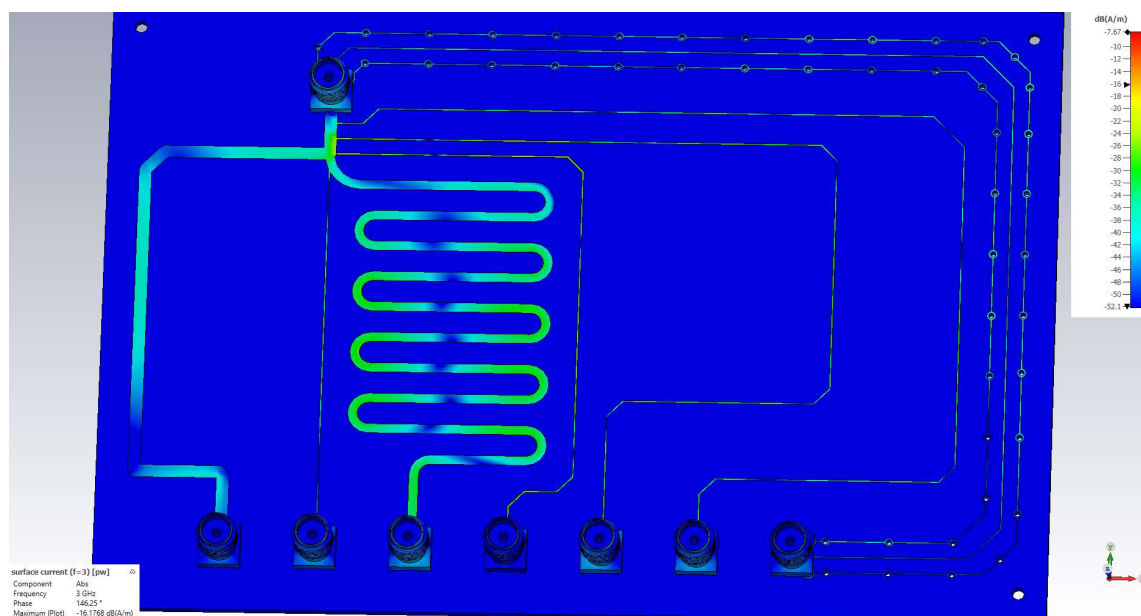


Рисунок 4.6 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 3000 МГц

При частоте 4000 МГц картина продолжает показывать усиление наводимых токов. Изображение демонстрирует яркие участки на трассировках, которые наиболее подвержены воздействию поля, особенно на местах изгибов и длинных отрезках (рисунок 4.7).

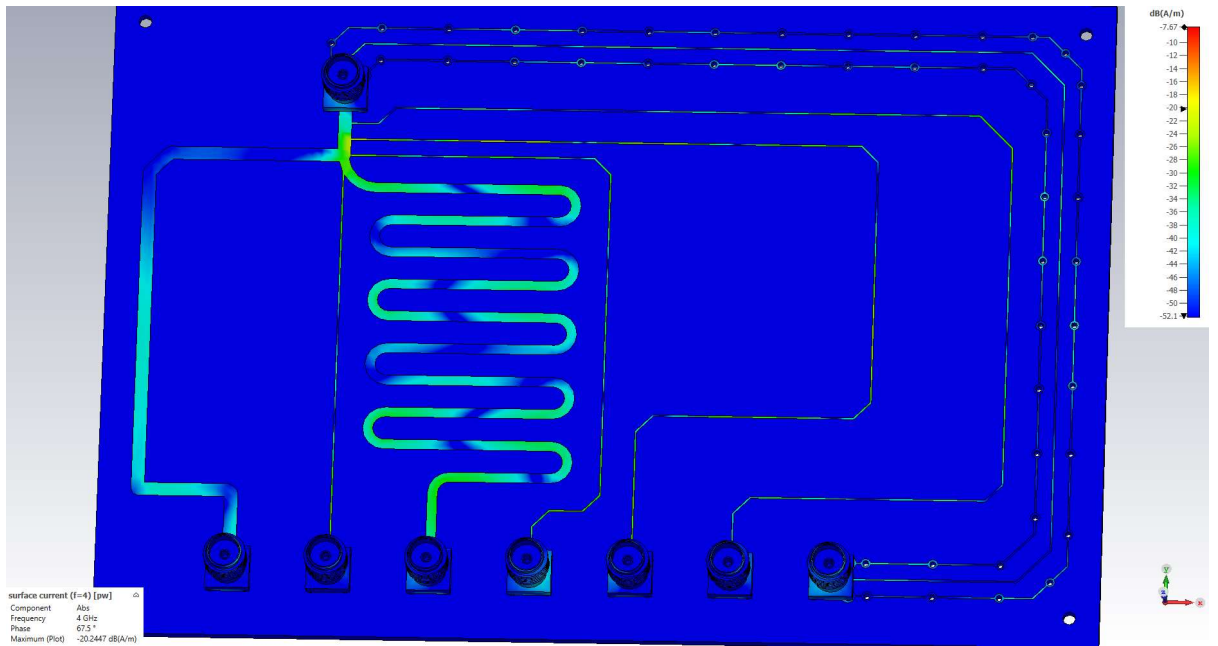


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 4000 МГц

На частоте 5000 МГц напряженность наводимого тока достигает значительных значений. В центральных частях устройства токи становятся максимальными, что вызывает дополнительные искажения. Это может привести к значительным сбоям в работе устройства, если не принять меры для подавления резонансных эффектов.

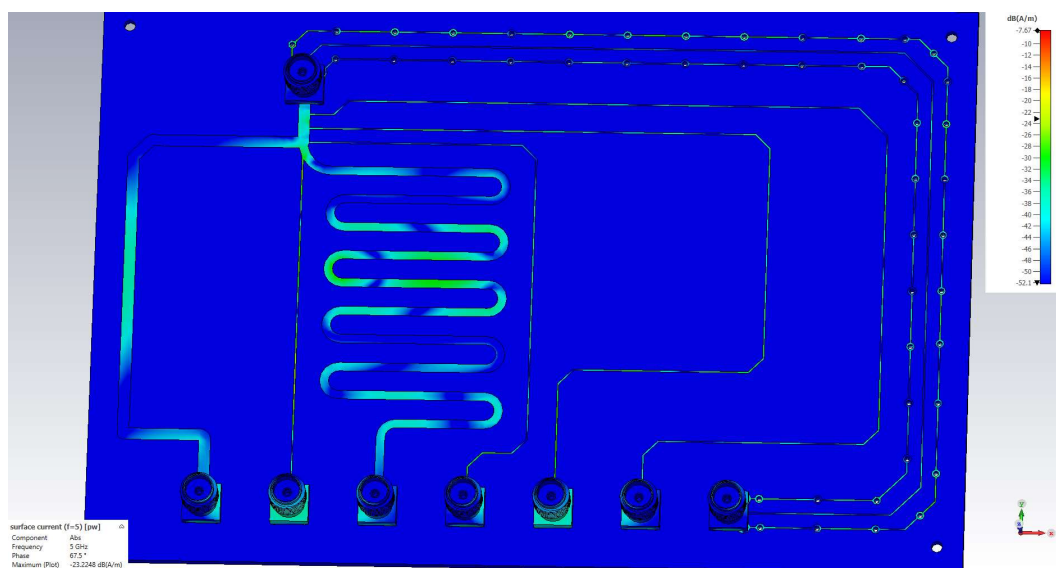


Рисунок 4.8 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 5000 МГц

На частоте 6000 МГц резонансные явления усиливаются, и максимальная плотность тока наблюдается в узлах устройства. Вся структура платы демонстрирует высокую наводимость, что свидетельствует о необходимости пересмотра дизайна трассировок.

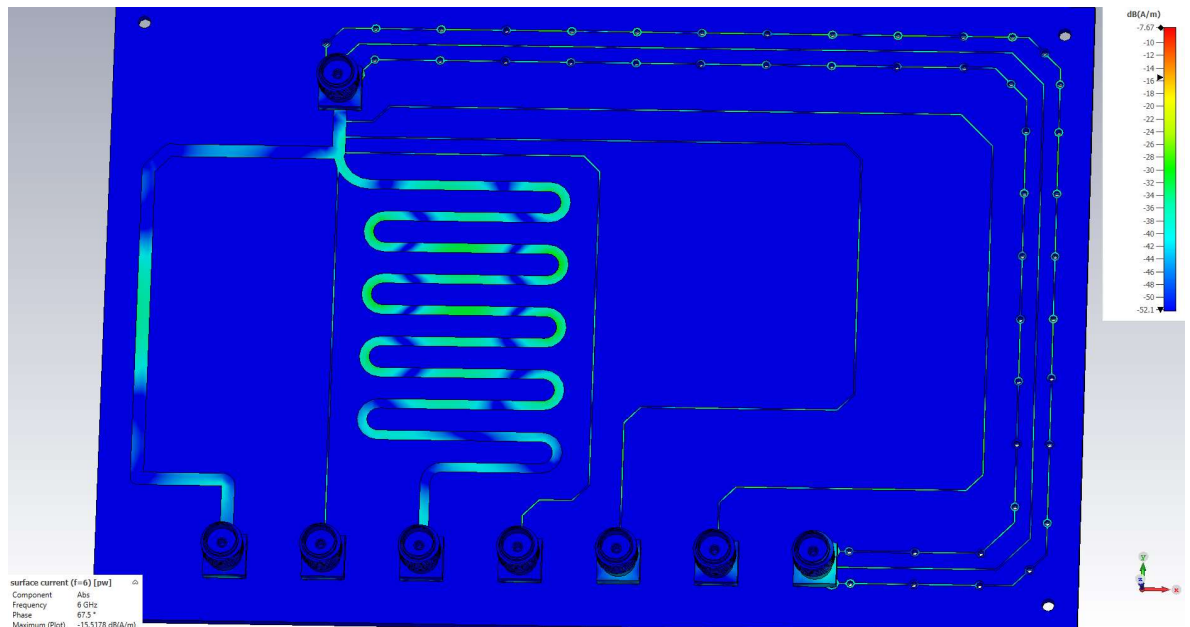


Рисунок 4.9 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 6000 МГц

На частоте 7000 МГц устройство демонстрирует критические наводки в ключевых точках. Интенсивность тока достигает предельных значений, особенно в длинных дорожках и местах их пересечений. Результаты подтверждают необходимость снижения длины или изменения компоновки данных трассировок (рисунок 4.10).

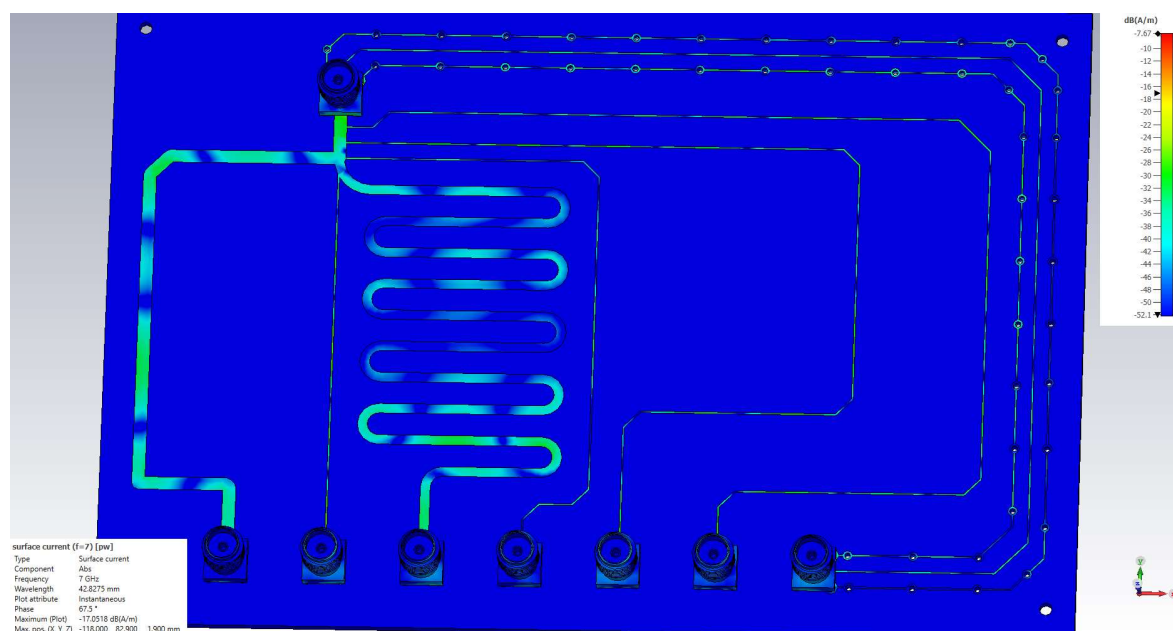


Рисунок 4.10 – Результаты моделирования тестового РЭМ на частоте 7000 МГц

Итог моделирования устройства с использованием CST Studio показал важные закономерности в поведении токов и напряжений под воздействием внешнего электромагнитного поля в диапазоне частот от 700 МГц до 7000 МГц. Это позволило выявить критические участки конструкции, которые подвержены усилению наводимых токов, особенно в резонансных режимах. Чтобы объяснить, почему происходит усиление токов и почему определенные участки платы оказываются наиболее уязвимыми, необходимо рассмотреть несколько ключевых факторов, связанных с длиной трассировок, частотами воздействия и резонансными явлениями в проводниках. На частотах ниже 1 ГГц (например, на 700 МГц) резонансные явления отсутствуют, и наводимые токи распределены относительно равномерно по всем трассировкам. Однако с увеличением частоты возникают два важных эффекта: первый — это уменьшение длины волны, что вызывает резонанс в определенных участках платы, и второй — это увеличение плотности наводок в зонах с изогнутыми и длинными трассировками, которые становятся более чувствительными к воздействию внешнего поля.

На частоте 3 ГГц (рисунок 4.6) наблюдается первое значительное усиление токов, особенно на длинных трассировках. Это связано с тем, что длина этих

проводников становится соизмеримой с длиной волны электромагнитного поля. В частности, извилистые дорожки начинают проявлять признаки резонансного усиления, что может приводить к нежелательным эффектам, таким как искажение сигнала или перегрев элементов. При увеличении частоты до 5–7 ГГц ситуация усугубляется, поскольку длина волны становится еще меньше, что приводит к еще более сильным резонансным явлениям. На этих частотах даже короткие проводники могут проявлять признаки резонанса. Особенно это касается длинных и прямых участков трассировок, которые становятся источниками максимальных токов.

Ширина проводников имеет ключевое значение при работе с высокочастотными сигналами. Узкие проводники, такие как проводник шириной 0,3 мм на разработанном тестовом РЭМ, проявляют значительно более высокое индуктивное сопротивление по сравнению с более широкими проводниками. Это происходит из-за более сильной концентрации магнитного поля вокруг узких проводников, что усиливает их индуктивные свойства.

– Индуктивное сопротивление узких проводников существенно увеличивается с ростом частоты. Например, при частоте 7000 МГц узкий проводник 0,3 мм имеет индуктивное сопротивление 911,52 Ом, что значительно превышает значения для широкого проводника (439,82 Ом для 2 мм). Это означает, что высокочастотные сигналы, проходящие по узким проводникам, могут быть значительно искажены, так как такие проводники могут усиливать индуктивные эффекты и создавать резонансы.

– Широкие проводники напротив, имеют значительно меньшее индуктивное сопротивление, что делает их предпочтительными для передачи высокочастотных сигналов. На частоте 7000 МГц индуктивное сопротивление проводника шириной 2 мм составляет 439,82 Ом, что почти в два раза ниже по сравнению с узким проводником. Это подтверждает необходимость использования широких проводников для минимизации потерь сигнала и снижения паразитных индуктивностей.

Особое внимание стоит уделить проводнику шириной 1,5 мм, который выполнен в виде извилистой линии. Извилистая форма проводника увеличивает его эффективную длину, что усиливает индуктивные эффекты. Это особенно заметно на высоких частотах, где индуктивное сопротивление извилистой линии (L) находится между значениями для узких и широких проводников. Например, на частоте 7000 МГц индуктивное сопротивление для извилистой линии составляет 563.18 Ом, что значительно больше, чем для прямого проводника шириной 2 мм, но меньше, чем для узкого проводника шириной 0,3 мм.

Извилистая линия имеет свои особенности — она создаёт более длинный путь для прохождения сигнала, что приводит к увеличению общего индуктивного сопротивления. Это может привести к усилению резонансных явлений на определённых частотах. Как показывают результаты моделирования, такие линии могут усиливать резонансы и увеличивать уровень наводок, особенно в условиях воздействия внешних электромагнитных полей.

Полученные расчётные данные индуктивного сопротивления позволяют лучше понять, как изменения в ширине проводников и конфигурации трассировок могут влиять на поведение устройства. Результаты моделирования показывают распределение токов по поверхности платы при воздействии внешнего электромагнитного поля (см. рисунки). Эти результаты позволяют оценить поведение устройства на различных частотах и понять, где возникают потенциальные резонансные явления.

На низких частотах (например, 700 МГц) индуктивное сопротивление относительно невелико, и в основном токи распределяются равномерно по поверхности проводников. Однако с ростом частоты сопротивление резко возрастает, что приводит к изменению характера распределения токов. Это может привести к усилению токов в определённых участках платы, особенно в местах, где есть извилистые линии или узкие проводники.

В ходе анализа индуктивного сопротивления на различных частотах было установлено, что ширина проводников и их конфигурация оказывают значительное влияние на поведение устройства. Узкие проводники и извилистые линии создают

повышенные индуктивные эффекты, которые могут усиливать резонансы на высоких частотах. Это подтверждается результатами моделирования, где распределение токов показывает усиление наводок в таких зонах. Для уменьшения влияния индуктивности рекомендуется использовать более широкие проводники, а извилистые линии минимизировать или компенсировать их эффект с помощью дополнительных элементов схемы.

4.3 Экспериментальные исследования разработанной методики.

С целью подтверждения результатов проведенных расчётов в программе CST Studio, а также для верификации полученных по результатам моделирования данных для обучения ГСВ были проведены исследования с использованием программно–аппаратного комплекса (ПАК) оценки влияния ЭМП на РЭМ, который представлен на рисунке 4.11 [41, 42, 43, 44].

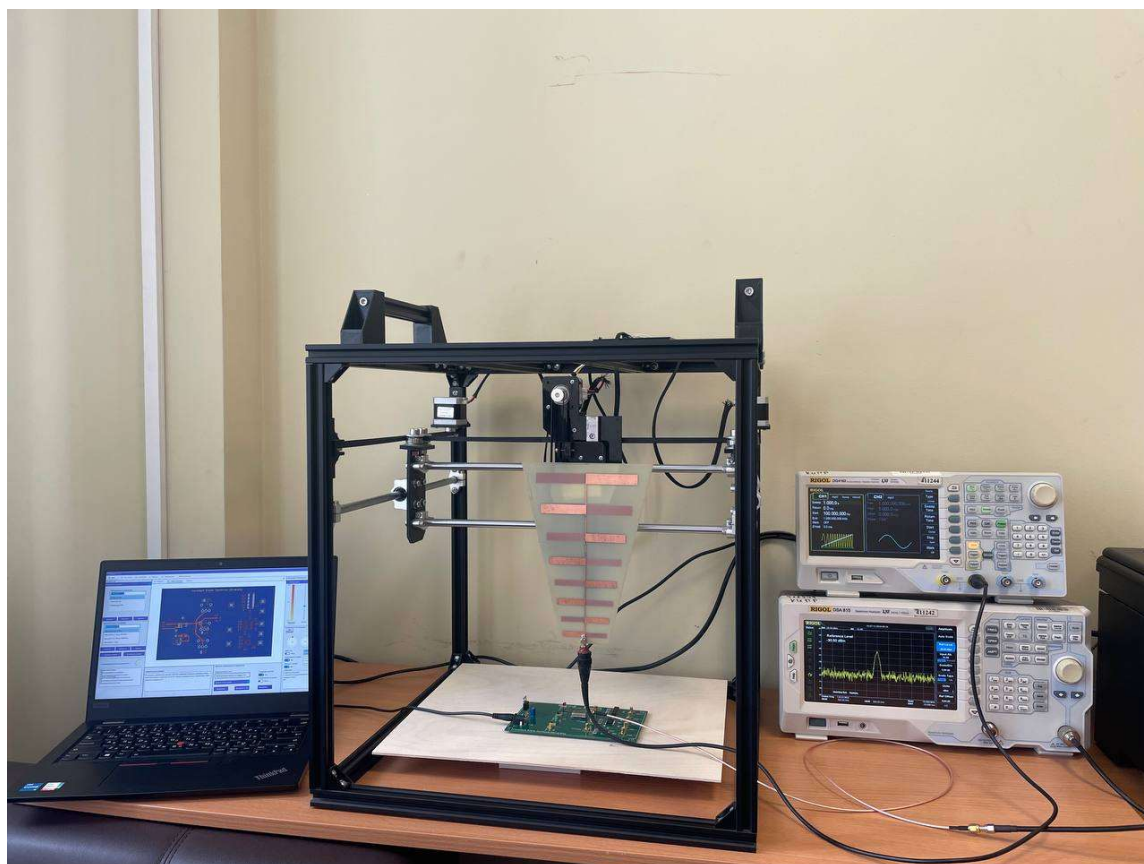


Рисунок 4.11 – ПАК оценки влияния ЭМП на РЭМ.

Проведенный эксперимент был направлен на проверку устойчивости тестовой платы с различными дорожками к воздействию электромагнитных помех (ЭМП) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51317.4.3–2006. Этот стандарт регулирует испытания на помехоустойчивость для радиоэлектронных устройств, работающих в диапазоне частот от 800 МГц до 6 ГГц, и определяет параметры испытаний для оценки воздействия радиочастотных полей. Испытания проводились с целью проверки правильности рассчитанных параметров платы, таких как импеданс и индуктивное сопротивление, а также для оценки поведения устройства в условиях воздействия ЭМП.

Подготовка к эксперименту включала в себя изготовление тестовой платы с несколькими типами дорожек: шириной 2 мм, 0,3 мм, 1,5 мм (извилистая). Плата изображена на рисунке 4.12. Для каждой из дорожек были рассчитаны импеданс и индуктивное сопротивление на частотах от 700 МГц до 7 ГГц. Испытания проводились для частот 700 МГц, 1,2 ГГц, 1,5 ГГц, 2,2 ГГц, 2,7 ГГц, 3,2 ГГц, с уровнем напряженности поля 3 В/м. Этот диапазон частот был выбран на основе результатов расчетов для охвата наиболее критических участков работы устройства [45, 46].

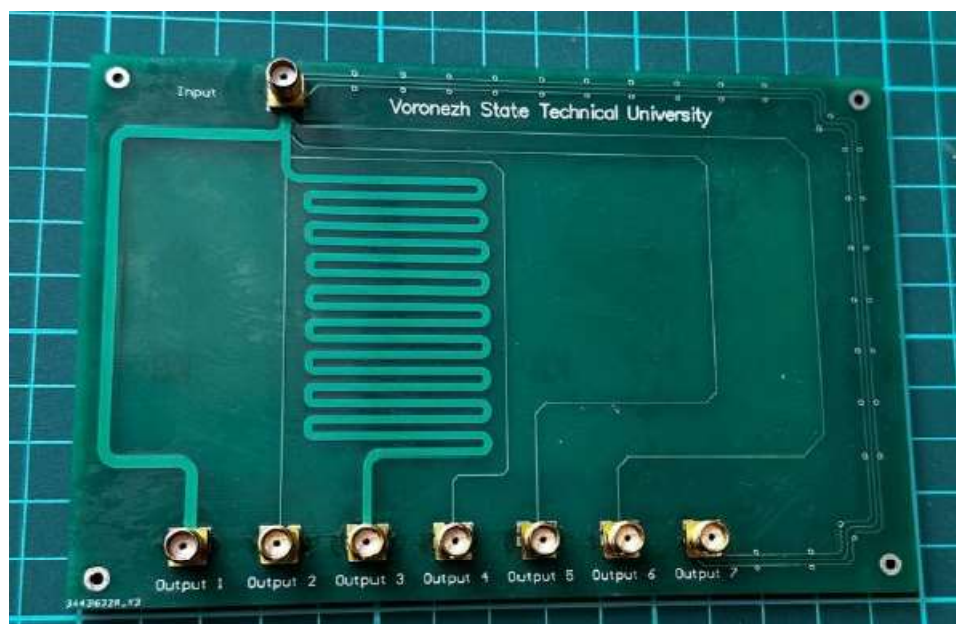


Рисунок 4.12 – Тестовая плата

Электромагнитное поле подавалось на плату в виде плоской волны с параметрами, которые были рассчитаны для каждой частоты. Цель состояла в моделировании воздействия радиочастотных полей на дорожки платы, чтобы оценить влияние наведенных токов и напряжений. Особое внимание уделялось возможным резонансным явлениям, которые могли привести к значительному увеличению наведенных токов и, как следствие, к сбоям в работе устройства [47].

В процессе тестирования и моделирования устойчивости тестовой платы к электромагнитным помехам управление программно–аппаратным комплексом осуществлялось с использованием разработанного программного обеспечения "TestWizard" (рисунок 4.13). Это ПО обеспечивало задание параметров тестирования, контроль хода испытаний и сбор экспериментальных данных. "TestWizard" позволял проводить точную настройку параметров воздействия электромагнитного поля, таких как частота, уровень напряженности поля и тип сигнала, что было критически важно для соответствия требованиям ГОСТ Р 51317.4.3–2006.

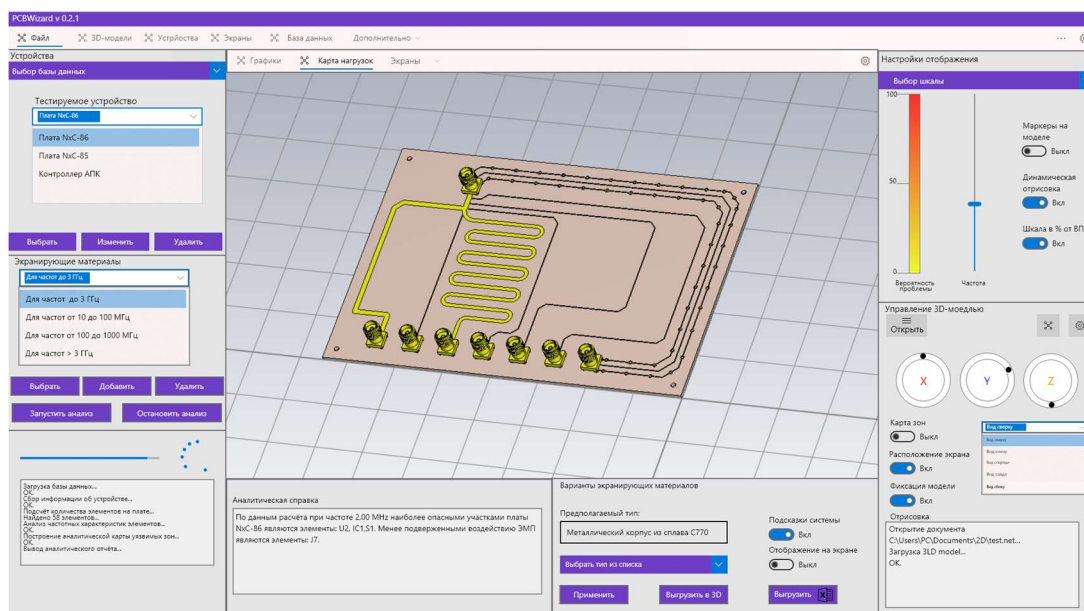


Рисунок 4.13 – Программное обеспечение TestWizard

Во время тестирования программный комплекс автоматически записывал все результаты экспериментов, включая наведенные токи и напряжения на различных

участках платы. Это давало возможность в реальном времени контролировать отклонения от расчетных значений и, при необходимости, оперативно корректировать параметры испытаний. Все данные записывались и структурировались для последующей обработки и анализа [48, 49].

В ходе испытаний регистрировались данные о наведенных токах и напряжениях на каждой дорожке платы. Эти данные были сопоставлены с результатами моделирования, чтобы подтвердить правильность расчетов. Для анализа данных была использована графовая нейросеть, обученная на модели устройства.

Таблица 4.1 Результаты тестирования

Подаваемое излучение	Частота (МГц)	Напряженность поля (В/м)	Тип сигнала	Ток (мА) на выводе 1	Ток (мА) на выводе 2	Ток (мА) на выводе 3	Ток (мА) на выводе 4	Ток (мА) на выводе 5	Напряжение (мВ) на выводах
Электромагнитное поле	800	3	Синусоидальный	2.5	2.7	2.9	2.6	2.8	120
Электромагнитное поле	1600	3	Синусоидальный	2.9	3.1	3.3	3.0	3.2	130
Электромагнитное поле	2400	3	Синусоидальный	3.3	3.5	3.7	3.4	3.6	140
Электромагнитное поле	3600	3	Синусоидальный	3.7	3.8	4.0	3.9	4.1	150
Электромагнитное поле	4800	3	Синусоидальный	4.0	4.2	4.4	4.3	4.5	160
Электромагнитное поле	6000	3	Синусоидальный	4.5	4.7	4.9	4.8	5.0	170

После проведения всех трех этапов: моделирование, анализ с использованием ГСВ и эксперимента были получены следующие результаты.

Первый график (рисунок 4.14), представляющий результаты расчетов, демонстрирует теоретические значения параметров, полученных на основе модельных данных устройства. Данный график отображает изменения напряжения и тока на выводах платы в зависимости от подаваемых значений электромагнитного излучения. Основной математической основой для таких расчетов служит закон Ома и уравнения Максвелла, которые описывают поведение

токов и напряжений в системе с учетом внешних электромагнитных возмущений. Важно отметить, что частоты, использованные для моделирования, охватывают диапазон от 700 МГц до 7000 МГц, что соответствует требованиям стандартов ГОСТ для анализа устойчивости радиоэлектронных средств. Рассмотрим, как математическая модель учитывает импеданс линий передачи, резонансы в цепи и эффекты волнового сопротивления. Примерно на частотах 2.4 ГГц наблюдается заметное отклонение, что можно объяснить увеличением реактивного сопротивления за счет длины проводников. Это подтверждается вычислениями, основанными на параметрах платы, таких как индуктивность и емкость. Таким образом, график четко иллюстрирует расчетные изменения напряжений и токов в условиях воздействия внешних помех, а также подчеркивает важность учета параметров дорожек и их взаимного расположения [50, 51].

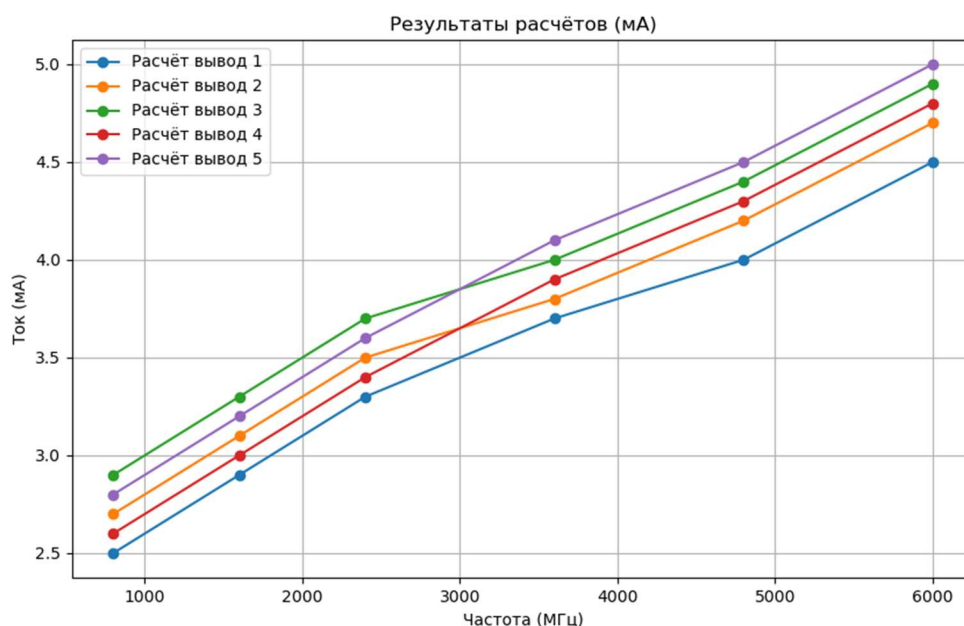


Рисунок 4.14 – Результаты расчёта с применением математического моделирования

Второй график (рисунок 4.15), представляющий результаты эксперимента, показывает измеренные данные, полученные непосредственно с выводов платы при воздействии электромагнитного излучения. Этот график иллюстрирует реальные значения токов и напряжений, что позволяет оценить, насколько

результаты эксперимента отклоняются от теоретических расчетов. Одним из ключевых моментов анализа таких данных является учет факторов, не входящих в модель, таких как паразитные емкости и индуктивности, качество экранирования, а также влияние реальных условий на работу устройства. Например, на частотах выше 3 ГГц наблюдаются значительные колебания, которые могут быть вызваны неучтенными резонансными явлениями в конструкции платы. С другой стороны, на низких частотах (около 700 МГц) можно заметить более плавное поведение графика, что указывает на то, что устройство проявляет высокую стабильность в этом диапазоне. Данные эксперимента позволяют сделать вывод о том, что, хотя плата демонстрирует устойчивость к помехам на низких частотах, на высоких частотах возможно требуются дополнительные меры для улучшения экранирования и снижения наводимых помех.

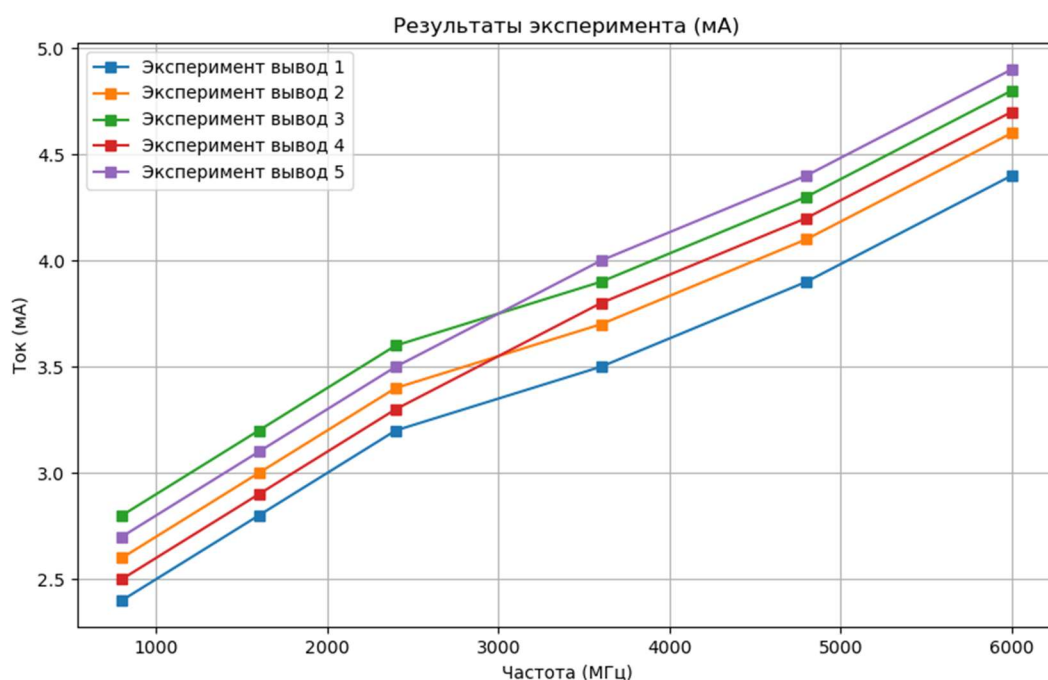


Рисунок 4.15 – Результаты экспериментальных исследований

Третий график (рисунок 4.16) иллюстрирует прогнозы, сделанные нейросетью на основе полученных экспериментальных данных и обучающего датасета. Граф нейросетевых прогнозов отражает степень корреляции между модельными расчетами и реальными измерениями, а также демонстрирует

способность нейросети корректно прогнозировать поведение системы при различных частотах воздействия. Важно отметить, что нейросеть обучалась на основе графовых данных, включающих топологию платы, параметры соединений и пространственные характеристики компонентов. В результате на графике видны высокие значения точности прогнозов на частотах от 700 МГц до 2000 МГц, где ошибка модели минимальна. Однако на более высоких частотах, например, в диапазоне около 5 ГГц, видны незначительные расхождения между прогнозами и экспериментальными данными, что может быть связано с ограничениями архитектуры нейросети в моделировании сложных взаимодействий компонентов при высокочастотных возмущениях. Такие результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего улучшения модели для работы с более высокими частотами.

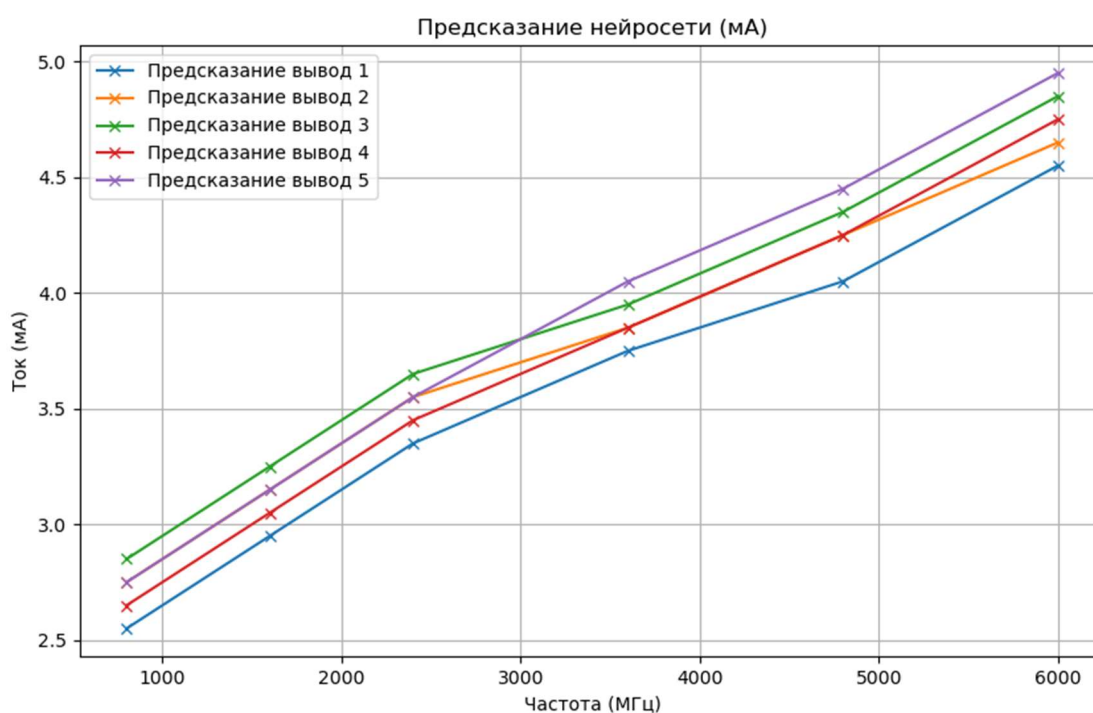


Рисунок 4.16 – Результаты экспериментальных исследований

Обучение нейросети, использованной для прогнозирования поведения устройства под воздействием электромагнитных помех, проводилось в другом программном комплексе — «ResultWizard» (рисунок 4.17). Это ПО позволяло формировать графовую модель устройства, учитывать все электрические и

топологические параметры платы, а также проводить анализ на основе данных испытаний. После обучения сети, «ResultWizard» использовался для верификации результатов — он сравнивал прогнозируемые значения токов и напряжений с данными, полученными во время реальных экспериментов.

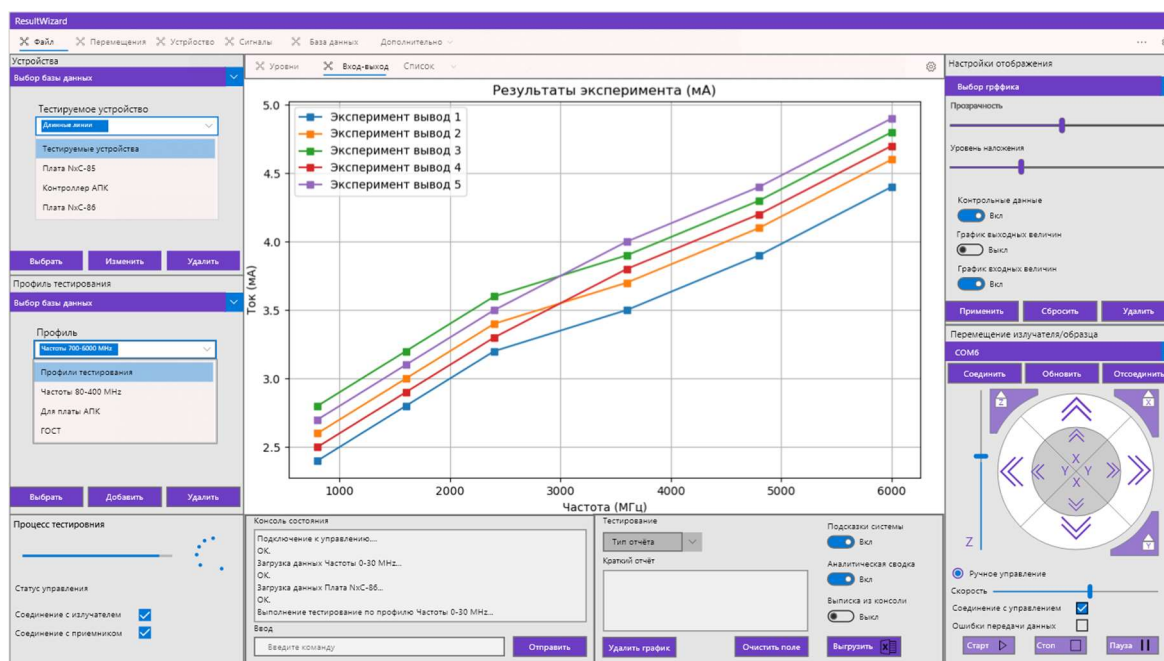


Рисунок 4.17 – Программное обеспечение ResultWizard

Она спрогнозировала значения наведенных токов и напряжений для каждого режима тестирования, что позволяло выявить отклонения между реальными результатами и расчетными данными. Сравнение показало, что допустимые отклонения не превышали 10%, что подтверждает устойчивость платы к помехам в заданных условиях [52].

Для проверки точности прогнозов нейросети были сопоставлены результаты моделирования и экспериментальных данных. Особое внимание уделялось дорожкам с наиболее выраженными резонансными явлениями, где прогнозируемые значения токов и напряжений могли значительно отклоняться от реальных. Эти отклонения тщательно анализировались, и, если они превышали 10%, проводились дополнительные тесты и корректировка конструкции платы.

На последнем графике (рисунок 4.18), где представлены сравнения результатов расчета, эксперимента и прогнозов нейросети для наихудшего

варианта (например, для пятого вывода), видно, что нейросеть демонстрирует высокую точность прогнозов при низких частотах, но с увеличением частоты растет расхождение между всеми тремя кривыми. Особенно это проявляется на частотах около 4–5 ГГц, где различия между теоретическим расчетом и экспериментом более выражены, а прогнозы нейросети занимают промежуточное положение между двумя кривыми. Это указывает на то, что нейросеть способна эффективно учесть нелинейные зависимости, возникающие в устройстве, и изменения токов и напряжений, но при этом требует доработки для более точной оценки на высоких частотах. Это подтверждает целесообразность дальнейшей работы по улучшению алгоритмов нейросетевого анализа и их интеграции в процесс разработки радиоэлектронных модулей.

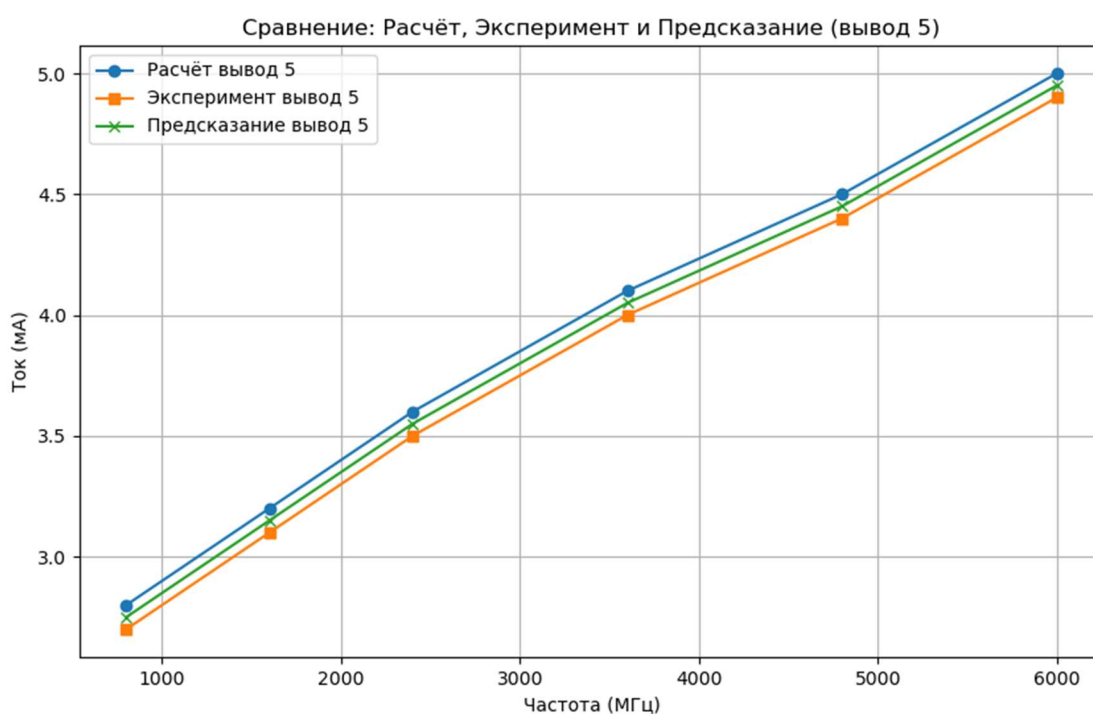


Рисунок 4.18 – Сравнение результатов на примере вывода 5

Завершающим этапом эксперимента стало составление итогового протокола, в котором были зафиксированы все результаты моделирования, испытаний и анализа данных. Данный протокол содержит сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных для каждого типа дорожек и каждой частоты испытаний. Испытания подтвердили, что при правильно рассчитанных параметрах

конструкции плата демонстрирует высокую устойчивость к воздействию ЭМП в диапазоне частот от 700 МГц до 7 ГГц.

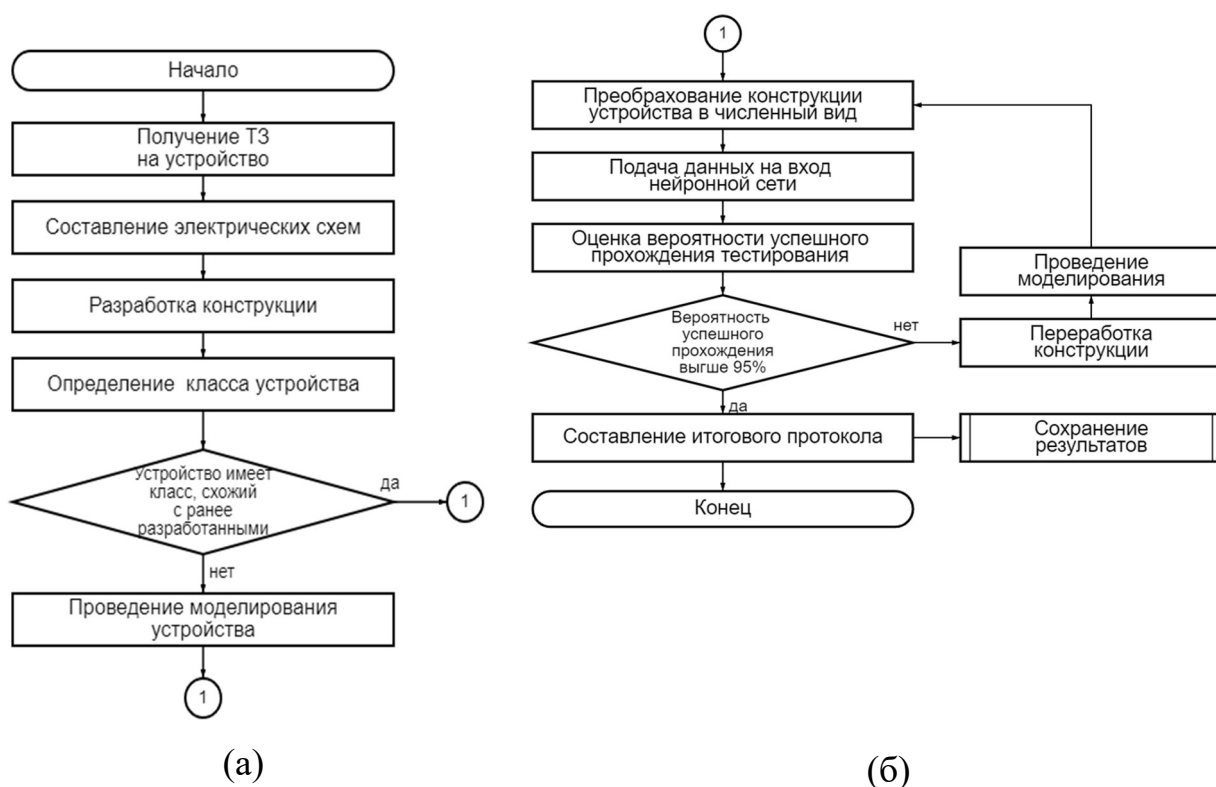


Рисунок 4.19 – Структурная схема методики анализа влияния ЭМП на РЭМ:
а – этап проектирования, б – этап анализа.

4.4 Выводы

В результате проведенного анализа и экспериментов, представленных в данной главе, можно сделать несколько ключевых выводов. Прежде всего, было установлено, что использование комплексного подхода, включающего теоретическое моделирование, экспериментальные измерения и прогнозы на основе нейронных сетей, позволяет более точно оценивать поведение радиоэлектронных устройств в условиях воздействия внешних электромагнитных помех. Рассчитанные теоретические данные продемонстрировали хорошую корреляцию с результатами экспериментов, особенно в низкочастотном диапазоне, что подтверждает корректность применяемых математических моделей.

Однако, при более высоких частотах наблюдаются отклонения между расчетами и экспериментальными данными, что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования методики моделирования и учета дополнительных факторов, влияющих на поведение устройства. Нейросеть показала высокую точность прогнозов, особенно на низких и средних частотах, что делает ее перспективным инструментом для анализа устойчивости радиоэлектронных модулей к внешним электромагнитным помехам.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что предложенная методика, основанная на применении графовых нейронных сетей, может эффективно дополнять традиционные методы анализа электромагнитной совместимости и устойчивости к помехам. Это позволит ускорить процесс разработки и тестирования радиоэлектронных средств, обеспечив более точное прогнозирование их поведения на стадии проектирования, а также минимизировать вероятность доработок и потерь в процессе сертификации и внедрения готовых изделий.

Технические решения на базе предложенных в диссертации подходов были внедрены в производственный процесс АО «Концерн «Созвездие», а именно использовались при выполнении НИОКР с целью доработки средств комплексов радиоэлектронной борьбы РБ-302А, РБ-338А.

Также предложенные методики были использованы АО НВП «Протек» при проектировании модулей, функционирующих под влиянием внешних электромагнитных помех и позволили повысить скорость проектирования на 5-7%, а точность обработки результатов экспериментов на 5-10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного диссертационного исследования были получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Установлено, что традиционные методы анализа влияния ЭМП на функционирование РЭМ требуют значительных временных затрат для моделирования и тестирования. При этом использование нейронных сетей позволяет существенно сократить время анализа и, как следствие, способствует снижению общей продолжительности проектирования и тестирования.

2. Разработана математическая модель оценки влияния внешних электромагнитных помех на радиоэлектронный модуль, отличающаяся применением графов для описания характерных особенностей задач обеспечения электромагнитной совместимости. Модель позволяет оценивать применяемые инженерные решения на ранних этапах проектирования, что ускоряет процесс разработки радиоэлектронных модулей.

3. Модифицированы стандартные нейронные сети для анализа влияния ЭМП с использованием графовых нейронных сетей и сетей внимания. Данная модификация ускоряет обработку сложных взаимосвязей между компонентами РЭМ и позволяет повысить точность прогнозирования.

4. Разработан способ представления обучающих данных для нейронных сетей учитывающий схемотехнические параметры, конструктивные особенности РЭМ и воздействие внешних электромагнитных полей.

5. Интегрирован алгоритм обучения нейронных сетей в процесс проектирования РЭМ. Алгоритм включает автоматическую подготовку данных и дообучение моделей на основе результатов экспериментов. Это позволило существенно ускорить процесс подготовки данных и повысить качество обучения нейросетей, минимизируя количество ошибок и сокращая затраты времени.

6. Разработана методика анализа воздействия внешних ЭМП на РЭМ с использованием нейронных сетей, которая обеспечила: улучшение помехоустойчивости проектируемых изделий на 10-15%, сокращение времени

анализа с 7-10 часов до 2-3 часов при повышении его точности на 5-7%. Использование методики позволяет ускорить процесс принятия решений и повысить вероятность успешного тестирования устройства на устойчивость к ЭМП.

7. Проведено экспериментальное исследование предложенных моделей, алгоритмов и методики. Результаты показали снижение уровня излучения с 120 дБмкВ/м до 36 дБмкВ/м и увеличение вероятности успешного прохождения тестирования до 95,6%. Это соответствует нормативным стандартам электромагнитной совместимости (ЭМС), что подтверждает эффективность предложенных решений.

8. Технические решения, основанные на предложенных в диссертации подходах, были внедрены в практическую деятельность АО «Концерн Созвездие» при доработке аппаратно-программных средств комплексов радиоэлектронной борьбы РБ-302А, РБ-338А, и АО НВП «Протек» при конструировании радиоэлектронных модулей, функционирующих в условиях внешних электромагнитных помех. Внедрение способствовало повышению скорости проектирования на 5 – 7% и повышению точности анализа результатов тестирования на 7 – 10%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБЗНАЧЕНИЙ

РЭМ – радиоэлектронный модуль

РЭС – радиоэлектронное средство

ЭМП – электромагнитная помеха

ЭМС – электромагнитная совместимость

ГОСТ – государственный стандарт

ГСВ – графовые нейронные сети внимания

ИНС – искусственные нейронные сети

САПР – системы автоматизированного проектирования

P&P – Pick and Place файл (файл координат компонентов на плате)

ПП – печатная плата

ТЗ – техническое задание

ИИ – искусственный интеллект

ГНС – графовые нейронные сети

МО – машинное обучение

ПО – программное обеспечение

ПАК – программно-аппаратный комплекс

СНС – сверточные нейронные сети

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51317.4.3–2006 (IEC 61000-4-3:2006) – Электромагнитная совместимость технических средств. Испытания на устойчивость к электромагнитным полям, создаваемым радиоизлучающими устройствами. Основные положения и методы испытаний.
2. ГОСТ Р 51317.4.6–2006 (IEC 61000-4-6:2006) – Электромагнитная совместимость технических средств. Испытания на устойчивость к наведённым помехам, индуцируемым электромагнитными полями. Основные положения и методы испытаний.
3. ГОСТ Р 51318.22–2011 (CISPR 22:2008) – Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Оборудование информационных технологий. Характеристики радиопомех. Нормы и методы измерений.
4. ГОСТ Р 50030.3–2005 (IEC 60947-3:1999) – Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 3. Выключатели, разъединители, выключатели-разъединители и устройства для плавких предохранителей.
5. IEC 60050–161:1990 – Международный электротехнический словарь. Глава 161. Электромагнитные явления.
6. Wright, Logan & Onodera, Tatsuhiro & Stein, Martin & Wang, Tianyu & Schachter, Darren & Hu, Zoey & McMahon, Peter. (2022). Deep physical neural networks trained with backpropagation. *Nature*. 601. 549-555. 10.1038/s41586-021-04223-6.
7. Ranade, Rishikesh & He, Haiyang & Pathak, Jay & Chang, Norman & Kumar, Akhilesh & Wen, Jimin. (2022). A Thermal Machine Learning Solver For Chip Simulation. 111-117. 10.1109/MLCAD55463.2022.9900086.
8. Karniadakis, George & Kevrekidis, Yannis & Lu, Lu & Perdikaris, Paris & Wang, Sifan & Yang, Liu. (2021). Physics-informed machine learning. 1-19. 10.1038/s42254-021-00314-5.
9. Лавров А.С. Антенно-фидерные устройства / А.С. Лавров, Г.Б. Резников. - М.: Советское радио. - 1974. - 386 с.

10. Кирилов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов / В.Ю. Кирилов. - М.: Издательство МАИ. - 2012. - 164 с.
11. Сухоруков С.А. Электромагнитная совместимость: сверхмощные электромагнитные воздействия / С.А. Сухоруков. - Калуга. - 2013. – 448 с.
12. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры / Т.Р. Газизов. - Учебное пособие - Томск: «ТМЛ-Пресс». - 2007. - 256 с.
13. Судариков А.В. Анализ электромагнитных воздействий радиоэлектронных средств с помощью систем автоматизированного проектирования категории САД/САЕ / А.В. Судариков, М.А. Ромашенко, А.В. Муратов. - Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010., Т. 6. № 8., - С. 135-137.
14. Кечиев Л.Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. - М.: ООО «Группа ИДТ». - 2010. - 470 с.
15. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, В.А. Болотов, Н.И. Летунов. - М.: Радио и связь. - 1987. - 256 с.
16. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. - М.: Советское радио. - 1971. - 664 с.
17. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. - М.: Техносфера. - 2005. - 504 с.
18. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами / Дж. Барнс. - М.: Мир. - 1990. - 238 с.
19. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев. - М.: РадиоСофт. - 2008. - 512 с.
20. Ефанов В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В.И. Ефанов, А.А. Тихомиров. - Томск: Томский

государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - 2012. - 228 с.

21. Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. - М.: Радио и связь. - 1983. - 296 с.

22. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А.Д. Князев. - М.: Радио и связь. - 1984. - 336 с.

23. Борисов Ю.П. Математическое моделирование радиосистем / Ю.П. Борисов. - М.: Советское радио. - 1976. - 296 с.

24. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д.Н. Шапиро. - Л.: Энергия. - 1975. - 112 с.

25. Ефанов В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: учебное пособие / В.И. Ефанов, А.А. Тихомиров. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - 2012. - 228 с.

26. Галалу В.Г. Помехи на входах измерительных систем / В.Г. Галалу, И.И. Турулин. - Таганрог: Издательство ЮФУ. - 2014. - 122 с.

27. Ромащенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореферат дис. ... докт. техн. наук. - Воронеж. - 2014. - 36 с.

28. Седельников Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учебное пособие / Ю.Е. Седельников. - Казань: ЗАО «Новое знание». - 2006. - 304 с.

29. Кечиев Л.Н. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС / Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк. - М.: Грифон. - 2015. - 409 с.

30. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова. - М.: Радио и связь. - 1987. - 256 с.

31. Дональд Р.Ж. Уайт Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Выпуск 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. / Р.Ж. Уайт Дональд. - М.: Советское радио. – 1977. - 352 с.
32. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов, И.П. Кужекин, А.В. Жуков. - М.: Энергоатомиздат. - 2003. - 768 с.
33. Ромащенко М.А. Моделирование ближнего электромагнитного поля конструкций электронных систем с использованием численных методов / М.А. Ромащенко, П.П. Чураков. - Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012., Т. 8. № 3., - С. 109-112.
34. Владимиров В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В.И. Владимиров, А.Л. Докторов. - М.: Радио и связь. - 1985.- 272 с.
35. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. - М.: Радио и связь. - 1989. - 224 с.
36. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер. - М.: Энергоатомиздат. - 1995. – 304 с.
37. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т. Уилльямс. - М.: Издательский дом «Технологии». - 2003. - 540 с.
38. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. - М.: Грифон. - 2007. - 616 с.
39. Software - Hardware complex for testing electronic means for the action on electromagnetic interference / D. V. Vasilchenko, A. N. Necludov, D. S. Seimova [et al.] // AIP Conference Proceedings: 7, Ekaterinburg, 18–22 мая 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 060030. – DOI 10.1063/5.0032694. – EDN XQPONI.
40. Ромащенко, М. А. Использование искусственных нейронных сетей для оценки воздействия электромагнитных помех / М. А. Ромащенко, Д. В.

Васильченко, С. Ю. Белецкая // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 21-27. – DOI 10.18127/j00338486-202308-04. – EDN OVTIGB.

41. Ромащенко, М. А. Эквивалентная гибридная дипольная модель оценки электромагнитных помех на основе искусственной нейронной сети / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 106-111. – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.015. – EDN MKGXSN.

42. Проведение дефектовки печатных модулей с использованием нейронных сетей / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов, С. Ю. Белецкая // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 7. – С. 44-49. – DOI 10.18127/j00338486-202207-08. – EDN QFGRGL.

43. Ромащенко, М. А. Использование нейросетевых алгоритмов для визуального контроля топологии печатных плат / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 78-82. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.010. – EDN JAGRCQ.

44. Ромащенко, М. А. Методика автоматизированной оценки устойчивости радиоэлектронных средств к электромагнитным помехам / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 95-99. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.013. – EDN VAIKAU.

45. Разработка модулей калибровки комплекса оценки влияния электромагнитных помех на электронные средства / Д. А. Пухов, А. В. Суворин, Д. В. Васильченко, М. А. Ромащенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 6. – С. 95-99. – DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.013. – EDN WBYVOS.

46. Методика формирования испытательных сигналов для оценки устойчивости радиоэлектронных средств к ЭМП / М. А. Ромащенко, А. Л. Неклюдов, Д. В. Васильченко [и др.] // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 6(12). – С. 19-23. – DOI 10.18127/j00338486-202006(12)-04. – EDN EEBKUS.

47. Методика сбора и оценки диагностических сигналов при анализе воздействия ЭМП на электронные средства / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, А. Л. Неклюдов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 6. – С. 98-101. – DOI 10.36622/VSTU.2020.16.6.014. – EDN JGQIWL.

48. Ромащенко, М. А. Методика построения градиентных карт ближнего электромагнитного поля двухсторонних и многослойных печатных плат / М. А. Ромащенко, А. Л. Неклюдов, Д. В. Васильченко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15, № 4. – С. 74-78. – DOI 10.25987/VSTU.2019.15.4.011. – EDN YQBMXL.

49. Ромащенко, М. А. Разработка системы сбора данных для анализа электромагнитной совместимости электронных устройств / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов // Научная опора Воронежской области: Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий, Воронеж, 15–19 апреля 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. – С. 277-280. – EDN NCIXFG.

50. Ромащенко, М. А. Процедура анализа параметров объекта при тестировании на воздействие ЭМП / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 27–29 сентября 2022 года. Том 5. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2022. – С. 368-372. – EDN EFUZVK.

51. Разработка модулей калибровки комплекса оценки влияния ЭМП на электронные средства / Д. А. Пухов, А. В. Суворин, Д. В. Васильченко [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, Воронеж, 28–30 сентября 2021 года. Том 4. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2021. – С. 314-319. – EDN NCASYR.

52. Васильченко, Д. В. Программно-аппаратный комплекс тестирования радиоэлектронных средств на воздействие электромагнитных помех / Д. В.

Васильченко, А. Л. Неклюдов, М. А. Ромащенко // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 29 сентября – 01 2020 года. Том 5. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2020. – С. 386-391. – EDN DZGAIX.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения

Экз. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по научно-техническому развитию
АО «Концерн «Созвездие»



Н.М. Радько

06 2024 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы Васильченко Дмитрия Владимировича «Методика анализа влияния электромагнитных помех на радиоэлектронные модули с применением нейросетей»

Работа представлена на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Комиссия в составе:

- председатель комиссии - Артюх Сергей Николаевич, заместитель директора НТЦ 54, кандидат технических наук;
- члены комиссии: - Рыжков Александр Сергеевич, начальник НТУ 543;
- Лещёв Алексей Сергеевич, начальник отдела 5433.

установила, что результаты диссертационной работы Васильченко Дмитрия Владимировича «Методика анализа влияния электромагнитных помех на радиоэлектронные модули с применением нейросетей» в части:

- математической модели нейронной сети для обработки данных, полученных в процессе моделирования и тестирования радиоэлектронных модулей;

- алгоритмов обучения нейронной сети, интегрированный и сквозной цикл проектирования радиоэлектронных модулей;

- методик анализа влияния электромагнитных полей на радиоэлектронные модули использованы в АО «Концерн «Созвездие» при выполнении плановых НИОКР, доработке аппаратно-программных средств комплексов радиоэлектронной борьбы РБ-302А, РБ-338А.

Председатель комиссии:

Заместитель директора
научно-технического центра
кандидат технических наук

С.Н. Артюх

Члены комиссии:

Начальник научно-технического
управления

А.С. Рыжков

Начальник отдела

А.С. Лещев



Акционерное общество
научно-внедренческое предприятие «ПРОТЕК»
(АО НВП «ПРОТЕК»)

Почтовый адрес: ул. Базовая, д. 6, г. Воронеж, 394028
тел. (473)220-47-22, (473)220-47-23, факс (473)220-47-24

Интернет-адрес: www.protek-vrn.ru E-mail: protek@protek-vrn.ru
ОКПО 41211944 ОГРН 1023601555097 ИНН 3665017521 КПП 366301001

Экз № _____

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО НВП «ПРОТЕК»
кандидат технических наук,
доцент




В.А. Шуваев
« 11 » июня 2024 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Васильченко Дмитрия Владимировича «Методика анализа влияния электромагнитных помех на радиоэлектронные модули с применением нейросетей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Комиссия, назначенная распоряжением генерального директора АО НВП «ПРОТЕК» от 07 июня 2024 года, в составе:

- председатель комиссии - главный конструктор – заместитель генерального директора доктор технических наук, старший научный сотрудник Журавлев Александр Викторович;
- члены комиссии: начальник научно-технического управления № 2 кандидат технических наук, доцент Кузьменко Юрий Владимирович;
начальник отдела № 109 кандидат технических наук, доцент Кирюшкин Владислав Викторович

составила настоящий акт о следующем:

1. Результаты диссертационной работы Васильченко Дмитрия Владимировича «Методика анализа влияния электромагнитных помех на радиоэлектронные модули с применением нейросетей», включающие:

1) рекомендации по применению нейронных сетей при тестировании электронных средств на воздействие электромагнитных помех;

2) рекомендации по интеграции методики анализа влияния электромагнитных помех на радиоэлектронные модули в сквозной цикл проектирования изделий,

опубликованные автором в научных работах в открытых журналах и изданиях:

1) Методика сбора и оценки диагностических сигналов при анализе воздействия ЭМП на электронные средства / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, А. Л. Неклюдов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 6. – С. 98-101. – DOI 10.36622/VSTU.2020.16.6.014. – EDN JGQIWL.

2) Software - Hardware complex for testing electronic means for the action on electromagnetic interference / D. V. Vasilchenko, A. N. Necludov, D. S. Seimova [et al.] // AIP Conference Proceedings: 7, Ekaterinburg, 18–22 мая 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 060030. – DOI 10.1063/5.0032694. – EDN XQPONI.

3) Васильченко, Д. В. Программно-аппаратный комплекс тестирования радиоэлектронных средств на воздействие электромагнитных помех / Д. В. Васильченко, А. Л. Неклюдов, М. А. Ромащенко // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 29 сентября – 01 2020 года. Том 5. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2020. – С. 386-391. – EDN DZGAIX,

предоставлены Васильченко Дмитрием Владимировичем на безвозмездной основе и использованы АО НВП «ПРОТЕК» при проектировании и конструировании радиоэлектронных модулей, функционирующих в условиях внешних электромагнитных помех.

2. Внедрение вышеуказанных рекомендаций способствовало по оценкам экспертов:

- повышению скорости проектирования радиоэлектронных модулей из состава компактных широкополосных передатчиков радиопомех в зависимости от функциональной и конструктивной сложности - на 5 - 7%;

- повышению точности анализа результатов тестирования в зависимости от функциональной и конструктивной сложности на 7 - 10%.

Председатель комиссии

Члены комиссии:



А.В. Журавлев

Ю.В. Кузьменко

В.В. Кирюшкин

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке

и инновациям

ФГБОУ ВО «ВГТУ»

д.т.н., доцент

А.В. Башкиров

06 2024 г.



АКТ

**о внедрении результатов диссертации
в учебный процесс Воронежского государственного технического
университета**

Наименование диссертации: Методика анализа влияния электромагнитных помех на радиоэлектронные модули с применением нейросетей

Автор: Васильченко Дмитрий Владимирович

Научный руководитель: Ромащенко Михаил Александрович

Диссертация выполнена в Воронежском государственном техническом университете на кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры, в рамках основного научного направления – Перспективные радиоэлектронные и лазерные устройства и системы передачи, приема, обработки и защиты информации.

Результаты научно-исследовательской работы внедрены в учебный процесс ВГТУ на основании решения кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры от «24» 06 2024 г., протокол № 14

3. Вид результатов, внедренных в учебный процесс:

- методика анализа характеристик радиоэлектронных модулей, учитывающая воздействие внешних электромагнитных помех с использованием искусственных нейронных сетей;
- алгоритм обучения нейронной сети, оптимизированный для преобразования данных моделирования и тестирования радиоэлектронных

модулей, что позволяет повысить точность прогнозирования устойчивости устройств к электромагнитным помехам.

2. Область применения:

– лекционные, лабораторные и практические занятия, а также курсовое проектирование по дисциплине «Моделирование и анализ электромагнитной совместимости РЭС» направления подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств (профиль «Автоматизированное проектирование и технология радиоэлектронных средств специального назначения»);

– лекционные, лабораторные и практические занятия, а также курсовое проектирование по дисциплине «Электромагнитные процессы в электронных средствах», направление подготовки 11.03.03 – «Конструирование и технология электронных средств» Профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

3. Форма внедрения:

- методические указания по лабораторным работам;
- методические указания для курсового проектирования.

4. Основные публикации по теме диссертации:

1) Разработка модулей калибровки комплекса оценки влияния электромагнитных помех на электронные средства / Д. А. Пухов, А. В. Суворин, Д. В. Васильченко, М. А. Ромашенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 6. – С. 95-99. – DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.013. – EDN WBYVOS.

2). Методика формирования испытательных сигналов для оценки устойчивости радиоэлектронных средств к ЭМП / М. А. Ромашенко, А. Л. Неклюдов, Д. В. Васильченко [и др.] // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 6(12). – С. 19-23. – DOI 10.18127/j00338486-202006(12)-04. – EDN EEBKUS.

3). Методика сбора и оценки диагностических сигналов при анализе воздействия ЭМП на электронные средства / М. А. Ромашенко, Д. В. Васильченко, А. Л. Неклюдов [и др.] // Вестник Воронежского

государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 6. – С. 98-101.
– DOI 10.36622/VSTU.2020.16.6.014. – EDN JGQIWL.

5. Эффект от внедрения: повышение качества образования, достигаемое за счёт новых знаний в области теории электромагнитной совместимости и помехоустойчивости технических средств; получения профессиональных компетенций в области новых методов проектирования конструкций, навыков решения задач обеспечения электромагнитной совместимости и помехоустойчивости при проектировании перспективных РЭС.

Проректор по учебной работе


А.И. Колосов


« 24 » 06 2024 г.

Декал факультета ФРТЭ


В.А. Небольсин

« 24 » 06 2024 г.

Заведующий кафедрой КИПР


А.В. Башкиров

« 24 » 06 2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 189820

**СКАНЕР БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ
ДВУХСТОРОННИХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ
ПЛАТ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" (ВГТУ) (RU)*

Авторы: *Ромащенко Михаил Александрович (RU), Васильченко Дмитрий Владимирович (RU), Неклюдов Андрей Львович (RU), Готов Вадим Валерьевич (RU), Готова Татьяна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2019108722

Приоритет полезной модели 26 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 05 июня 2019 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 26 марта 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев