

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель

Ромащенко Михаил Александрович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры конструирования
и производства радиоэлектронной аппаратуры

Официальные оппоненты:

Гизатуллин Зиннур Марселевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем
автоматизированного проектирования,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ»

Неровный Валерий Владимирович,
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
отдела перспективных технологий
и разработок АО НВП «Протек»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится 12 декабря 2024 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан « 18 » октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 и нарушениям в работе. 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 на самых начальных этапах разработки и проектирования печатного модуля, т.е. на внутриаппаратурном уровне обеспечения ЭМС.

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 сетей (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. Habiger), 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 повышением 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 51317.4.3-2013 и ГОСТ Р 51317.4.6-2013, 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.

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 с высокой вероятностью прогнозировать 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 схмотехнических 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 пять 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 НИР 2019.17 «Исследование и разработка методов комплексного анализа и оптимального синтеза на этапах функционального и конструкторского проектирования РЭС» и ГБ НИР 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, терагерцовые 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, 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 результатами и результатами 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 г., 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).

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 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены основные аспекты ЭМС РЭС и представлены современные тенденции обеспечения внутриаппаратурной ЭМС. Описаны особенности математического моделирования ЭМП, включая применение нейронных сетей. Математическое моделирование ЭМП является ключевым инструментом для анализа и прогнозирования поведения РЭМ при воздействии помех. В рассмотренных работах используются метод конечных элементов (FEM) для численного анализа электромагнитных полей, метод моментов (MoM) для анализа проводящих структур и антенных систем.

Представлен общий подход к оценке влияния ЭМП на РЭМ. Так неправильная трассировка печатных проводников может создать резонирующий контур, способный усилить воздействие ЭМП на определенной частоте. Такой контур можно описать параметрами резонансной частоты $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ и добротностью $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$, где L — индуктивность, C — емкость, и Δf — ширина полосы пропускания. При воздействии внешнего электромагнитного поля E на резонансной частоте, индуцированное напряжение $V_{\text{индуц}} = E \cdot l_{\text{эфф}}$ (где $l_{\text{эфф}}$ — эффективная длина проводника (антенны)) значительно усиливается за счет резонанса, достигая величины $V_{\text{рез}} = Q \cdot V_{\text{индуц}}$. Это может привести к существенным искажениям и нарушению работы устройства, так как индуцированное напряжение в контуре многократно возрастает.

Описаны классические приемы математического моделирования, существующие программные средства для анализа ЭМП. Во многих работах для моделирования ближнего поля и оценки влияния ЭМП на РЭМ применяется метод эквивалентных диполей. Установлено, что перспективным направлением в области повышения эффективности проектирования РЭС является разработка подходов прогнозирования восприимчивости изделий к ЭМП с использованием нейронных сетей типа Long Short-Term Memory и графовых нейронных сетей.

В процессе разработки РЭМ осуществляется последовательный переход через несколько основных этапов: определение требований и разработка концепции устройства, схмотехническое проектирование, разработка топологии печатного модуля и математическое моделирование. Интеграция нейронных сетей в данные этапы (блоки 1, 2 и 3 на рис. 1) позволит оценить правильность схмотехнических решений с использованием предобученной модели нейронной сети. Для повышения достоверности анализа предлагается использовать дополнительные данные, полученные в ходе проведения моделирования воздействия внешних ЭМП.

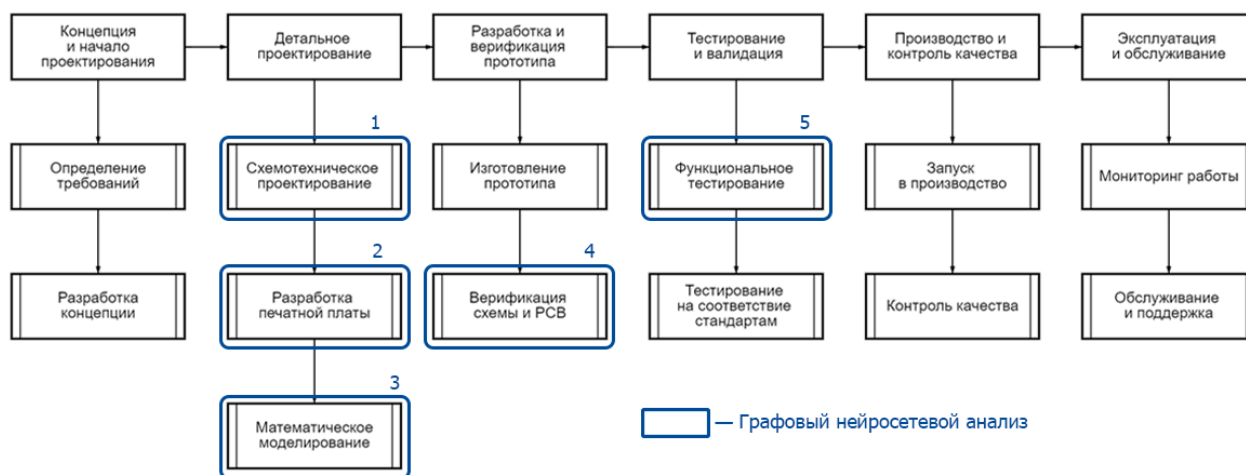


Рис. 1 – Интеграция нейронных сетей в сквозной цикл проектирования радиоэлектронных модулей

Изготовление прототипа, верификация схемы и печатной платы (блок 4 на рис. 1) с применением нейросети позволяет выявить потенциальные ошибки и проблемные места на ранних стадиях проектирования. Применение на данном этапе программно-аппаратного комплекса позволяет провести оперативный анализ влияния ЭМП за счёт автоматизированного процесса управления тестированием и автоматического сбора результатов эксперимента. Этап тестирования и валидации включает функциональное тестирование и проверку на соответствие стандартам и нормативным требованиям (блок 5 на рис. 1), где нейросети улучшают качество прогнозирования устойчивости РЭМ к ЭМП. На каждом из указанных этапов производится дополнительный сбор данных и корректировка весовых коэффициентов модели графовой нейронной сети (ГНС), что позволяет повысить скорость и качество обучения.

В выводах главы сформулирована цель и основные задачи исследования

Во второй главе рассматриваются принципы применения графовых методов для анализа воздействия ЭМП на РЭМ. Предлагается представлять параметры РЭМ как набор взаимосвязанных узлов и рёбер. При этом узлы представляют собой радиоэлектронные компоненты (резисторы, конденсаторы, микросхемы и т.д.), а рёбра - электрические соединения между компонентами. Атрибуты узлов включают тип компонента, номинал, координаты на плате и слой размещения. Атрибуты рёбер включают параметры межсоединений (индуктивность, ёмкость, сопротивление) и текущие параметры цепи (токи, напряжения, частоты). Общий вид графа представляется в виде выражения $G = (V, E, W, X, A)$, который включает определение множества узлов $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$; 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 узлов; A – матрица смежности, используемая для представления соединений между компонентами

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

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:

$$X = \begin{pmatrix} t_i & v_i & x_i & y_i & z_i & l_i \\ t_i & v_i & x_i & y_i & z_i & l_i \\ t_i & v_i & x_i & y_i & z_i & l_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где t_i – тип компонента; v_i – номинальное значение компонента; (x_i, y_i, z_i) – координаты размещения компонента; l_i – слой размещения.

Для анализа графа используется матрица Лапласиана L :

$$L = D - A, \quad (3)$$

где D - диагональная матрица степеней узлов; A - матрица смежности.

При анализе графа выявляются критические узлы и рёбра, а также производится оценка уязвимости компонентов к воздействию ЭМП. На рис. 2 представлена структурная схема способа формирования графа свойств РЭМ на основе данных о печатном модуле.

Далее следует процесс преобразования графового представления свойств РЭМ в числовые векторы, которые могут быть непосредственно обработаны нейронной сетью. Для этого предлагается использовать подход на основе принципа случайного блуждания по графу и обучение представлений, что позволяет получить векторы отражающие локальные и глобальные структуры графа. Для каждой узла генерируется набор случайных блужданий, в которых переходные вероятности, определяющие вероятность перехода из одного узла в другой, вычисляются в соответствии с выражением (4).

$$\pi_{vx} = \alpha_{pq}(t, x) \cdot w_{vx} \quad (4)$$

где w_{vx} — вес ребра (v, x) ; $\alpha_{pq}(t, x)$ — коэффициент, определяемый следующим образом:

$$\alpha_{pq}(t, x) = \begin{cases} \frac{1}{p} & \text{если } d_{tx} = 0 \\ 1 & \text{если } d_{tx} = 1, \\ \frac{1}{q} & \text{если } d_{tx} = 2 \end{cases} \quad (5)$$

где d_{tx} — кратчайшее расстояние между узлами t и x .

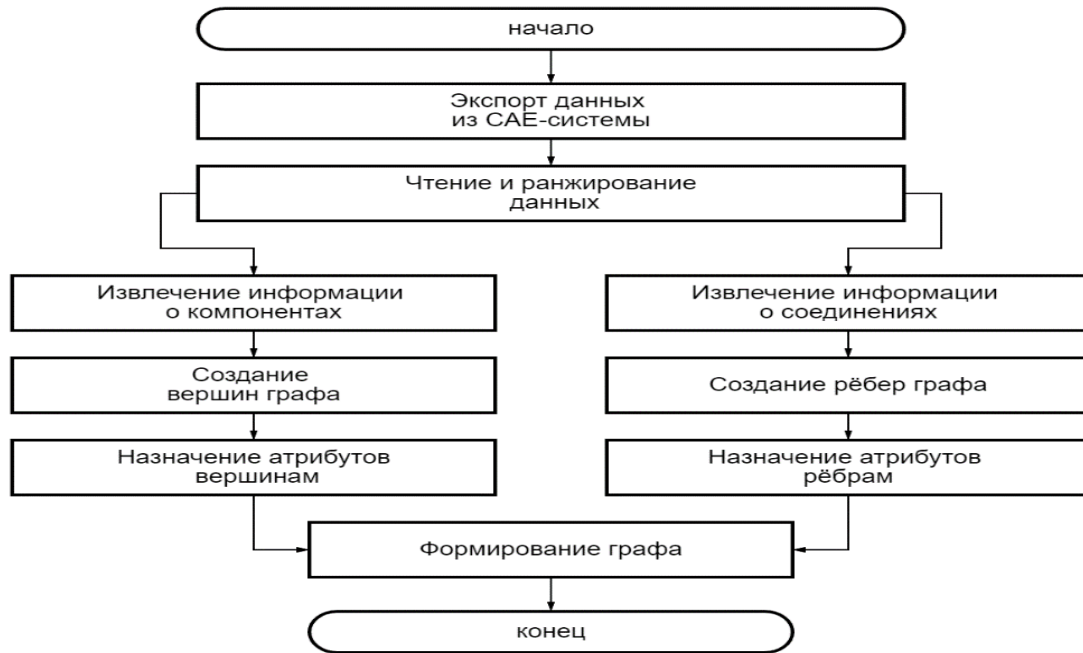


Рис. 2 – Структурная схема способа формирования графа свойств РЭМ на основе данных о печатном модуле

Технически обработка полученного графа производится при помощи графовой нейронной сети, при этом для анализа была выбрана комбинация алгоритмов Node2Vec и Graph Attention Networks (GAT). На рисунке 3 (а, б) представлена исходная топологическая модель печатной платы исследуемого устройства и соответствующий ей граф. На рисунке 3 (в) представлен результат преобразования графа в вектор после снижения размерности. Так, компоненты, имеющие схожие связи и функциональные зависимости, сгруппированы в кластеры, что позволяет выявить функциональные блоки или модули в схеме.

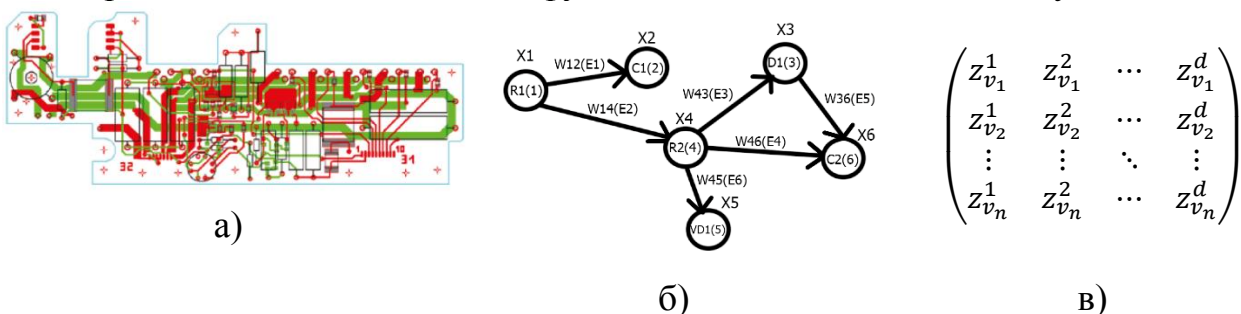


Рис. 3 – Формирование вектора представления ПП для обучения ИНС, где а – исходная печатная плата, б – граф печатной платы, в – вектор вложений платы в двумерном пространстве

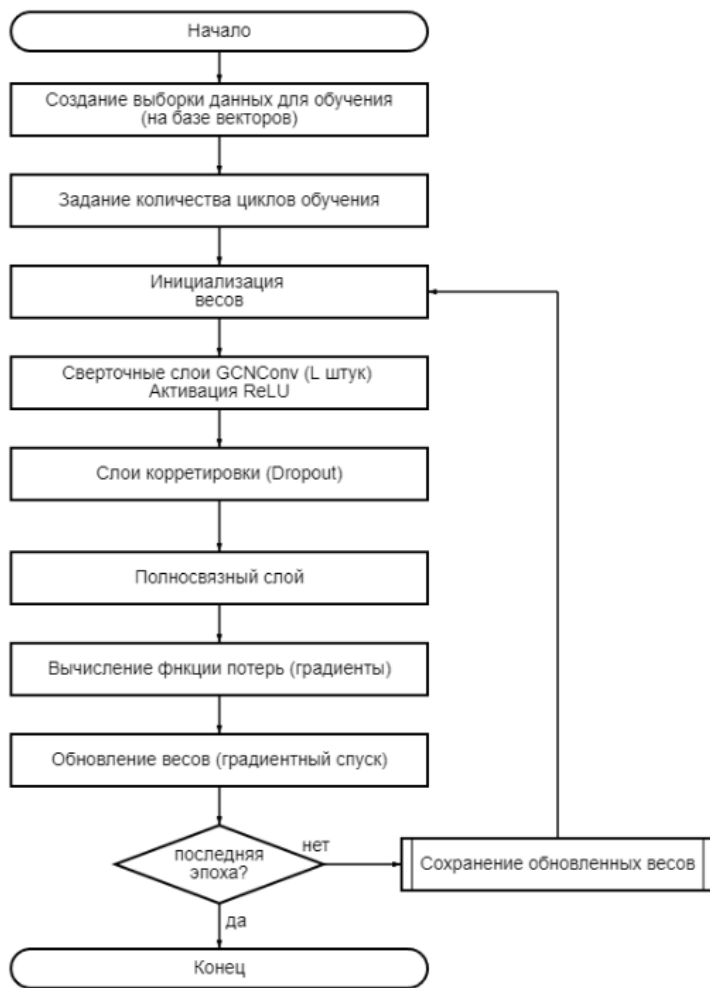


Рис. 4 – Алгоритм обучения нейронной сети

Процесс обучения начинается с создания датасета содержащего преобразованные графовые представления схем в числовые векторы. На основе этих данных создается обучающая выборка, которая включает обучающие данные (70%), тестовые данные (20%) и валидационные данные (10%). В качестве обучающих данных могут выступать как результаты моделирования, так и результаты натуральных экспериментов. Общий алгоритм обучения представлен на рисунке 4.

В процессе обучения сеть оптимизирует весовые коэффициенты начиная с первого слоя графовой сети внимания (GAT) и заканчивая полносвязным

слоем. Для активации используется функция ReLU, что позволяет модели обучаться нелинейным зависимостям в данных. Идентичность обучающих данных обеспечивается предварительной обработкой, включающей графовое представление топологии устройства и последующую векторизацию признаков. Результаты обучения разработанной GAT сети представлен на рисунке 5.

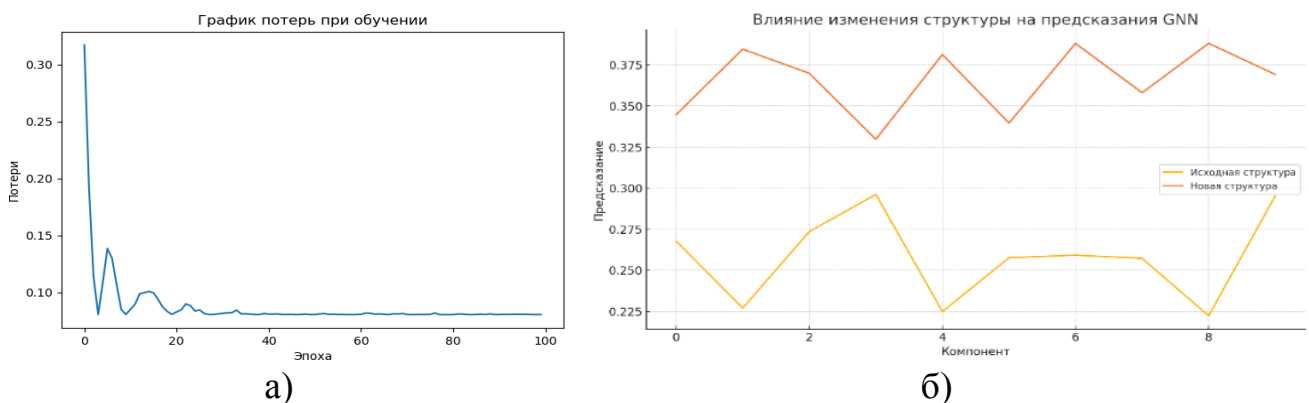


Рис. 5 – Тестовое обучение нейронной сети на базе графа печатной платы, где а – результаты обучения на 100 эпохах, б – результат влияния изменения номиналов компонентов на прогнозирование

В третьей главе рассматриваются этапы методики анализа воздействия ЭМП на РЭМ начиная с получения исходных данных и заканчивая оценкой вероятности успешного прохождения испытаний на устойчивость к внешним воздействиям. Методика позволяет оценить влияние ЭМП на работоспособность устройств и выявить уязвимые зоны на стадии проектирования. В ходе анализа создаётся графовое представление топологии печатной платы, где компоненты и их соединения преобразуются в узлы и рёбра графа. Затем сеть обучается на результатах моделирования и тестирования ранее разработанных устройств, что позволяет повысить точность прогноза и улучшить устойчивость проектируемых РЭМ.

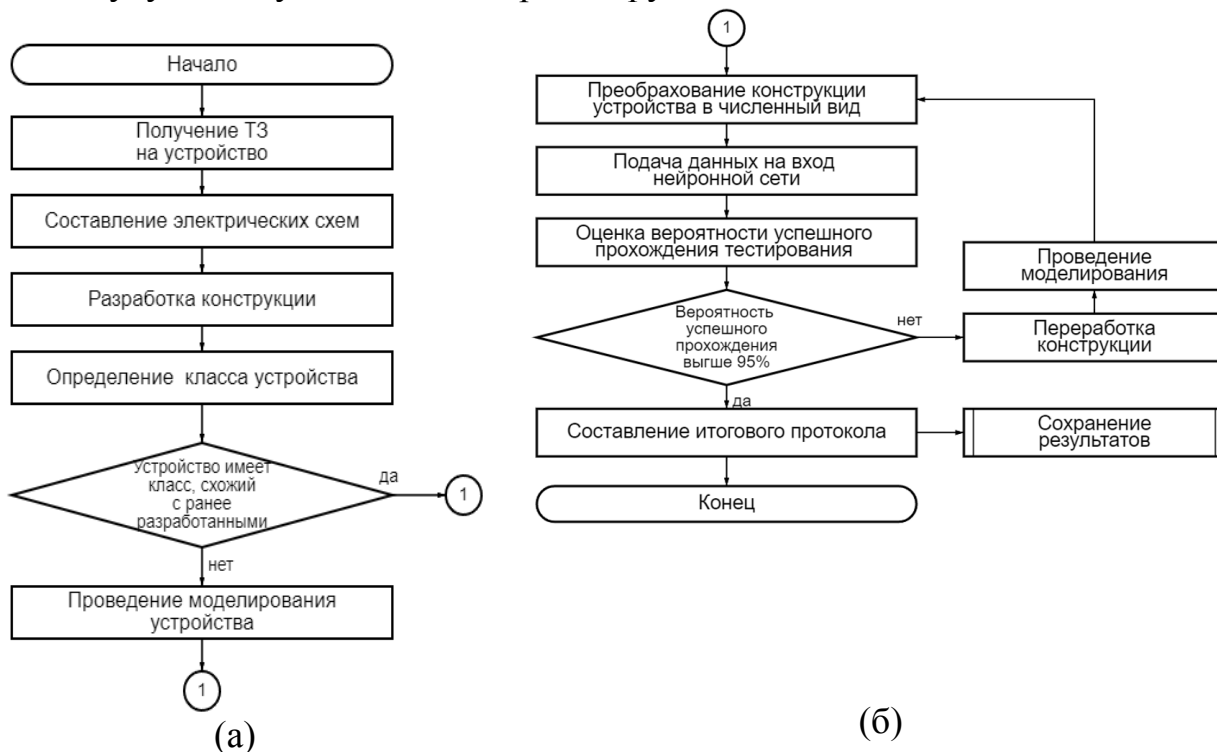


Рис. 6 – Структурная схема методики анализа влияния ЭМП на РЭМ, где а – этап проектирования, б – этап анализа.

Процесс анализа начинается с получения технического задания на разработку устройства и разработки электрической схемы. После этого происходит моделирование электрических характеристик устройства, определение его топологии и разработка физической конструкции. На основании данных о топологии проводится преобразование устройства в граф, где узлы графа соответствуют компонентам, а рёбра — электрическим соединениям между ними. Это позволяет сформировать модель, которая используется для последующего анализа устойчивости устройства к ЭМП.

Процесс тестирования устройства (рис. 7) начинается с задания параметров тестирования согласно ГОСТ. Далее проводится тестирование на воздействие ЭМП включающее постановку помех по требованиям ГОСТа и запись данных о функциональных параметрах устройства. После этого результаты тестирования оцениваются с применением нейросети, выявляются отклонения прогноза нейросети от фактических результатов тестирования и

сопоставляются с данными моделирования. Если отклонения меньше 10%, составляется итоговый протокол и результаты сохраняются; если отклонения превышают 10%, результаты используются для дальнейшего анализа и возможной корректировки конструкции.

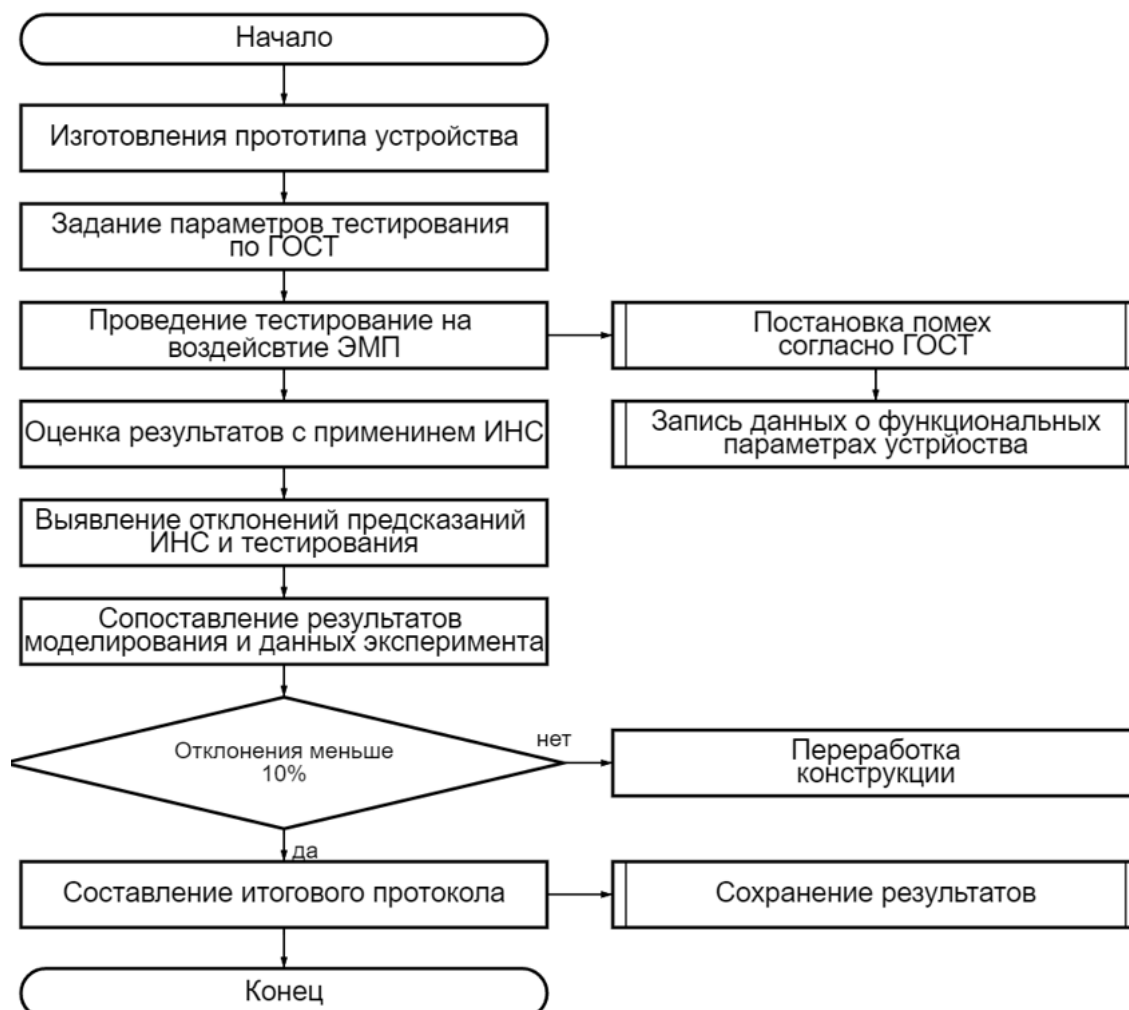


Рис. 7 – Тестирование устройства с применением нейросети

При этом формируется матрица, которая включает в себя измерения параметров устройства в процессе тестирования, измерение параметров воздействия и временную метку. Общий вид вектора матрицы представлен в выражении (8)

$$D[i, j] = (t_i, u_1(t_i), u_2, \dots, u_n(t_i), v_1(t_i), v_2(t_i), \dots, v_m(t_i)), \quad (8)$$

где $D[i, j]$ - i -я строка матрицы данных D содержащая все параметры в момент времени t_i ; $v_i(t)$ – значение i -го параметра воздействия в момент времени t ; $u_i(t)$ – значение i -го параметра устройства в момент времени t .

В процессе тестирования выявляется отклонение прогнозов нейронной сети от результатов тестирования, что помогает улучшить точность модели и в дальнейшем оптимизировать конструкцию устройства. Результаты моделирования сопоставляются с данными эксперимента для проверки

точности прогнозирований и анализа работы устройства. Расчёта отклонения происходит по выражению (9).

$$\delta_i = \hat{y}_i - y_i, \quad (9)$$

где \hat{y}_i – прогнозирование значений параметра устройства в момент времени t_i ; y_i – измеренное значение параметра устройства в момент времени t_i

При этом производится расчёт дисперсии отклонений и среднеквадратичного отклонения. Общая формула нахождения корреляции отклонений и прогнозируемого значения представлена в выражении (10).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (10)$$

где $\bar{\hat{y}}$ – среднепрогнозируемое значение; \bar{y} – среднеизмеренное значение.

Расчёт качества функционирования РЭМ производится исходя из полученных данных об индуцируемом напряжении на сформированных паразитных антеннах. Для этого определяется напряжение, влияющее на компоненты в узлах цепей согласно выражению (11).

$$F_i = \frac{V_{\text{рез}}}{V_{i,\text{макс}}}, \quad (11)$$

где $V_{i,\text{макс}}$ - максимальное допустимое напряжение для компонента i ; F_i – фактор перегрузки компонента i .

В таком случае обобщенная модель качества функционирования выражается как функция факторов перегрузки всех критических компонентов (12).

$$Q_{\text{РЭМ}} = f(\sum_i a_i F_i), \quad (12)$$

где a_i – весовой коэффициент, отражающий важность элемента i .

Процесс завершается составлением итогового протокола, включающего результаты моделирования, тестирования и рекомендации по улучшению конструкции устройства.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования разработанной методики, примененной к анализу тестового радиоэлектронного модуля. В качестве исходных данных для моделирования и анализа использовались расчеты выполненные с помощью программного обеспечения CST Studio. Исходные данные представляли собой 3D-модель тестируемого устройства с детализированной топологией компонентов и их соединений. В рамках исследований были выполнены расчеты отклика устройства на внешние электромагнитные воздействия различной частоты и интенсивности. На рисунке 8 представлен внешний вид расчетной модели в CST Studio.

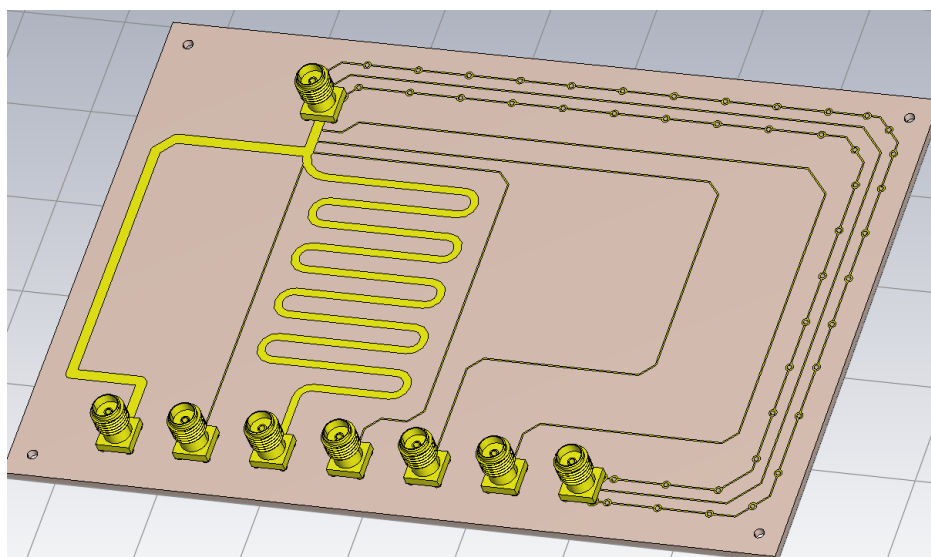


Рис 8 – Внешний вид расчётной модели тестового устройства

Было выполнено моделирование наводимого паразитного напряжения, индуцируемого внешними ЭМП в диапазоне частот от 700 МГц до 7000 МГц с шагом 500 МГц при напряженности поля до 3 В/м. Индуцированное напряжение оценивалось в районе чувствительных критических компонентов и длинных высокочастотных линиях, что позволило выявить наиболее уязвимые зоны. Результаты моделирования в CST Studio (таблица 1) были переданы в графовую нейронную сеть (GAT) для анализа и прогнозирования возможных точек отказа устройства при воздействии ЭМП.

Таблица 1 – Параметры расчёта в CST Studio

Частота (МГц)	Напряжённость поля (В/м)	Напряжение по результатам моделирования (мВ)
700	3	1.00
1200	3	1.10
1700	3	1.20
2200	3	1.30
2700	3	1.40
3200	3	1.50
3700	3	1.55
4200	3	1.60
4700	3	1.65
5200	3	1.70
5700	3	1.75
6200	3	1.80
6700	3	1.85
7000	3	1.90

Далее в соответствии с разработанной методикой было проведено экспериментальное исследование макета устройства. Эксперимент проводился с целью топологической верификации обеспечения требований помехоустойчивости по ГОСТ Р 51317.4.3-99 (МЭК 61000-4-3-95) и обеспечения бесперебойной работы испытуемого образца в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки. Тестирование проводилось на программно-аппаратном комплексе (рис. 9) с использованием программного обеспечения «PCB Wizard» (рис. 10а) входящего в его состав. Для проведения испытаний за основу была принята первая степень жесткости по ГОСТ Р 51317.4.3-99.

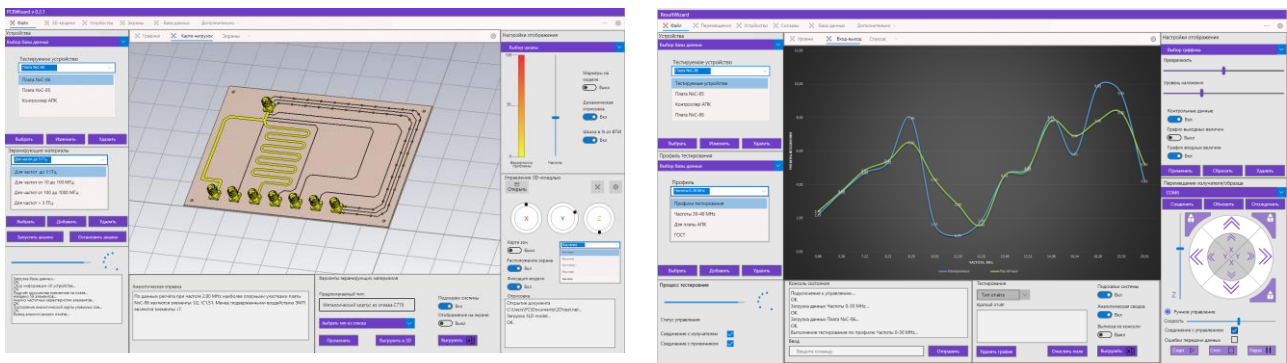


Рис. 9 – Экспериментальный стенд на базе программно-аппаратного комплекса

Исследования показали, что на частотах от 2000 МГц и выше наблюдалось увеличение наводимого напряжения, что могло привести к потенциальным сбоям в работе устройства. Так на частотах в районе 3000 МГц, было зафиксировано напряжение 1,5 мВ, что указывало на необходимость дополнительного экранирования или изменения конструкции для снижения влияния помех. Результаты эксперимента обрабатывались с применением разработанного программного обеспечения постобработки результатов «Res Wizard» (рис. 10б). Так в результате анализа тестового устройства было выявлено, что область порта 5 и его соединения является восприимчивой к внешнему полю. В таблице 2 приведены обобщенные результаты трех методов оценки, на рисунке 11 представлен график сравнения результатов.

Таблица 2 – Сравнение результатов экспериментального исследования

Частота (МГц)	Напряжённость поля (В/м)	Результаты моделирования (мВ)	Результаты прогнозирования (мВ)
700	3	1.00	1.05
1200	3	1.10	1.12
1700	3	1.20	1.18
2200	3	1.30	1.28
2700	3	1.40	1.42
3200	3	1.50	1.55
3700	3	1.55	1.58
4200	3	1.60	1.62
4700	3	1.65	1.70
5200	3	1.70	1.74
5700	3	1.75	1.80
6200	3	1.80	1.85
6700	3	1.85	1.90
7000	3	1.90	1.95



а) б)
Рис. 10 – Программное обеспечение ПАК,
а – ПО PCB Wizard, б – ПО Res Wizard

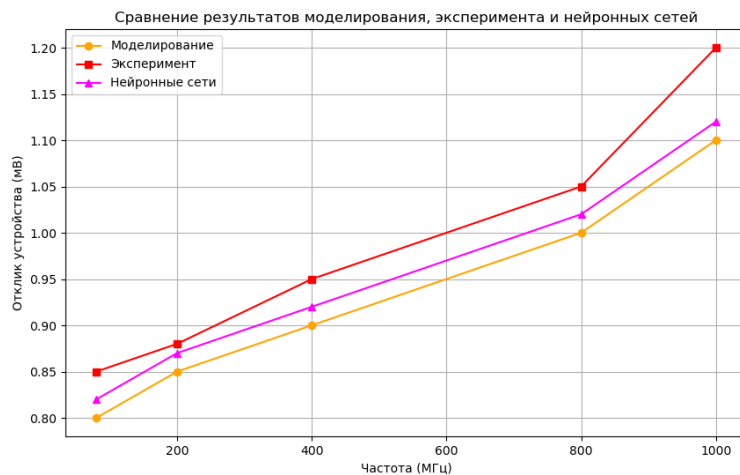


Рис. 11 – Результаты оценки влияния ЭМП на тестируемое устройство

Таким образом установлено, что применение нейронных сетей для обработки результатов экспериментальных исследований в сочетании с программно-аппаратным комплексом увеличивает точность локализации проблемных участков конструкции на 10-15%. На практике было показано, что подготовка данных о радиоэлектронных модулях для использования в нейронных сетях и последующая оценка векторных представлений модулей занимает на 30% меньше времени по сравнению с классическими методами математического моделирования. Так задача моделирования в специализированном ПО занимала около 6 часов, тогда как анализ с использованием разработанной методики на основе ИНС занимал 4 часа.

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 проведения моделирования и тестирования. При этом использование нейронных сетей позволяет существенно сократить время анализа и, как следствие, способствует снижению общей продолжительности времени вывода изделия на рынок.

2. Разработана математическая модель оценки влияния внешних ЭМП на РЭМ, отличающаяся применением графов для описания характерных особенностей задач обеспечения ЭМС. 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 (GAT). 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. Такой подход позволяет ускорить процесс подготовки данных и повысить качество обучения нейросетей, минимизируя количество ошибок и сокращая временные затраты.

6. Разработана методика анализа воздействия внешних ЭМП на РЭМ с использованием нейронных сетей, которая обеспечила: увеличение помехоустойчивости проектируемых изделий на 10-15% при сокращении времени анализа с 7-10 часов до 2-3 часов. 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 повышение помехоустойчивости модернизированных модулей с 12 дБмкВ/м до 36 дБмкВ/м и увеличение вероятности успешного прохождения тестирования до 95,6%. Модернизированные модули соответствуют нормативным требованиям 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 ЭМП. Внедрение способствовало повышению скорости проектирования на 5–7% и повышению точности анализа результатов тестирования на 7–10%.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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 ЕЕВКУS.

8. 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.

9. 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.

Публикации в международной базе Scopus:

10. 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.

11. Software - Hardware complex for assessing the effect of an electrostatic discharge on electronic devices / D. S. Seimova, D. V. Vasilchenko, A. N. Necludov [et al.] // AIP Conference Proceedings: 7, Ekaterinburg, 18–22 мая 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 060039. – DOI 10.1063/5.0032894. – EDN CARHNV.

Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций:

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

Патенты и зарегистрированные программы для ЭВМ:

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661268 Российская Федерация. Программный комплекс определения дефектов топологии радиоэлектронных компонентов: № 2023660252: заявл. 23.05.2023: опубл. 29.05.2023 / Д. В. Васильченко, М. А. Ромащенко, Д. А. Пухов

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686058 Российская Федерация. Программный комплекс спектрального анализа на базе алгоритмов машинного обучения: № 2023684738: заявл. 20.11.2023: опубл. 04.12.2023 / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686059 Российская Федерация. Программный комплекс формирования обучающего набора спектральных слепков: № 2023684737: заявл. 20.11.2023: опубл. 04.12.2023 / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686644 Российская Федерация. Программная реализация алгоритма обеспечения целостности сигнала при размещении согласующих резисторов: № 2023685318: заявл. 22.11.2023: опубл. 07.12.2023 / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686645 Российская Федерация. Программная реализация алгоритма обеспечения целостности питания при размещении развязывающих конденсаторов: № 2023685313: заявл. 22.11.2023: опубл. 07.12.2023 / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов

21. Патент на полезную модель № 189820 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/08. Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат: № 2019108722: заявл. 26.03.2019: опубл. 05.06.2019 / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, А. Л. Неклюдов [и др.]

Подписано в печать 10.10.2024.

Формат 60 × 84/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ № 244

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84