На правах рукописи



НГУЕН ДАНГ ХОП

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО АНАЛИЗА И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Рязань 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» на кафедре «Космические технологии».

Научный руководитель	**Васильев Евгений Петрович,** доктор технических наук, профессор кафедры «Космические технологии» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина», г. Рязань.
Официальные оппоненты:	**Давыдочкин Вячеслав Михайлович**, доктор технических наук, начальник отдела СВЧ устройств и антенн ООО Предприятие «КОНТАКТ-1», г. Рязань; **Шевгунов Тимофей Яковлевич,** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 405 «Теоретическая радиотехника» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита состоится «22» декабря 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно–технической библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент  Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Полосковые переключатели выполняют базовые функции коммутации и маршрутизации сигналов в современных радиотехнических системах, в значительной степени определяя их надёжность и эффективность. В частности, они широко применяются в трактах формирования и распределения сигналов цифрового телевидения высокой и ультравысокой чёткости, а также в системах спутникового телевизионного вещания, где требования к потерям, развязке и стабильности параметров напрямую определяют качество передаваемого изображения. Не менее востребованы полосковые переключатели в радиолокации – для коммутации каналов приёмных трактов фазированных антенных решёток и переключения поляризации зондирующего сигнала; в системах спутниковой и наземной передачи информации дециметрового и сантиметрового диапазонов – для коммутации каналов приёмопередающих модулей; а также в радиоастрономии и метрологии – для коммутации измерительных и калибровочных трактов широкополосных приёмных систем, где стабильность вносимых потерь и развязки непосредственно определяет точность измерений. С развитием технологий 5G, Wi-Fi 6/7 и спутниковой связи возрастают требования к компактности, широкополосности и помехоустойчивости подобных устройств.

Проектирование переключателей является сложной многопараметрической задачей: традиционное полноволновое электродинамическое моделирование (в таких средах, как ANSYS HFSS, CST) обеспечивает высокую точность, но требует от нескольких минут до нескольких часов на одну конфигурацию, что делает многовариантную оптимизацию крайне трудоёмкой. Ускоренными альтернативами служат матричный анализ коммутационных структур и аппроксимационное моделирование на основе искусственных нейронных сетей (ИНС); однако классические алгоритмы матричного анализа имеют кубическую вычислительную сложность $O(N^3)$, а существующие нейросетевые подходы разрабатываются индивидуально для конкретных типов устройств без единого универсального алгоритма.

В связи с вышеуказанным диссертационная работа, посвященная разработке моделей и алгоритмов проектирования полосковых переключателей с целью повышения точности и быстродействия решения проектных задач, имеет высокую степень **актуальности**.

Степень проработанности темы. В развитие теории анализа и синтеза полосковых переключателей существенный вклад внесли А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, Д.Л. Маттей, М.Е. Ильченко, И.В. Лебедев, А.Е. Знаменский, Л.В. Алексеев, Г.С. Хижа и др. Вопросы проектирования полосковых переключателей подробно освещены в работах В.И. Вольмана, С.И. Бахарева, I. Bahl, Г.Б. Дзехцера, О.С. Орлова, Н.Т. Бовы, Ю.В. Пименова, G.M. Rebeiz, S. Lucyszyn, J. Oberhammer. Математические модели ключе-

вых элементов исследовались В.В. Никольским, А.В. Вайсблатом, Е.И. Нефёдовым, Д.М. Сазоновым, D.M. Pozar, R. Garg. В последние годы активно развивается нейросетевое моделирование полосковых устройств, представленное в трудах Q.J. Zhang, K.C. Gupta, J.E. Rayas-Sánchez, Y. Cao, F. Feng, Z. Marinković, V. Devabhaktuni, E.K. Murphy.

Цель диссертации. Разработка моделей и алгоритмов проектирования полосковых переключателей и их ключевых элементов для повышения быстродействия и точности решения проектных задач.

Объектом исследования являются модели и алгоритмы проектирования полосковых переключателей (включая и ключевые элементы).

Предметом исследования являются математические модели и алгоритмы, а также программные средства проектирования полосковых переключателей, обеспечивающие улучшение показателей качества (увеличение быстродействия и точности решения проектных задач).

Задачи диссертации. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Выполнить обзор области применения, а также известных методов моделирования и оптимизации полосковых переключателей, выявив их преимущества и ограничения и тем самым обосновав актуальность поставленных задач.

2. Разработать математические модели ключевых элементов полосковых переключателей (электромеханических, PIN-диодных и полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ)), отражающие взаимосвязь конструктивных параметров и электрических характеристик; обосновать интегральный показатель качества для объективного сопоставления различных ключевых элементов.

3. Разработать модернизированный алгоритм многопараметрической оптимизации полосковых переключателей.

4. Разработать алгоритм создания нейросетевых моделей для ускоренного прогнозирования характеристик полосковых переключателей на основе данных полноволнового электродинамического моделирования.

5. Проверить работоспособность и адекватность разработанных моделей и алгоритмов на ряде конструкций полосковых переключателей.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории радиочастотных цепей, матричной алгебры, строгие численные методы электродинамического моделирования (метод конечных элементов FEM, метод моментов MoM), методы многопараметрической оптимизации, а также современные методы машинного обучения (аппарат искусственных нейронных сетей). Вычисления и электродинамическое моделирование проводились в средах AWR, Python и ANSYS HFSS.

Научная новизна

1. Обобщённый алгоритм матричного анализа и моделирования полосковых переключателей, отличающийся от известных универсальных

алгоритмов тем, что состояния переключателя учитываются непосредственно через граничные условия на зажимах базовых восьмиполюсников; это позволяет сворачивать их в четырехполюсники без формирования и решения систем линейных алгебраических уравнений высоких порядков, что снижает вычислительную сложность анализа и повышает быстродействие расчётов. (*Соответствует **п. 14 специальности 2.2.13** Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем, включая системы цифрового телевидения высокой, сверхвысокой, ультравысокой четкости и других форматов, для телевизионного вещания и специальных применений*).

2. Модернизированный алгоритм многопараметрической оптимизации полосковых переключателей, отличающийся от известных уточнением математических моделей ключевых элементов, в том числе аналитических выражений для герконового модуля, и аддитивной целевой функции, учитывающей оба режима переключения волновых каналов (пропускания и запирания). (*Соответствует **п. 15 специальности 2.2.13** Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем, включая системы и устройства аналогового и цифрового телевидения и оптико-электронных устройств*).

3. Впервые предложен универсальный алгоритм создания нейросетевой модели полосковых переключателей, не зависящий от типа устройства и физического механизма переключения, отличающийся от известных подходов, в которых нейросетевые модели разрабатываются индивидуально для каждого типа устройства, предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность аппроксимации для различных типов переключателей при единой архитектуре нейронной сети. (*Соответствует **п. 14 специальности 2.2.13** Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем, включая системы цифрового телевидения высокой, сверхвысокой, ультравысокой четкости и других форматов, для телевизионного вещания и специальных применений*).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Впервые разработана модель герконового модуля в приближении Т-волны с последующей конструктивной реализацией и проведением теоретических и экспериментальных исследований, частотный диапазон увеличен на порядок. (*Соответствует **п. 15 специальности 2.2.13** Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем, включая системы и устройства аналогового и цифрового телевидения и оптико-электронных устройств*).

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований новых конструктивно-топологических вариантов полосковых двух-, трёх- и четырёхканальных полупроводниковых переключателей, подтверждающие

адекватность разработанных математических моделей ключевых элементов и алгоритма многопараметрической оптимизации: для четырёхканального переключателя в полосе частот 2 ГГц с центральной частотой 10 ГГц измеренные потери в режиме пропускания составили не более 1,8 дБ при расчётных значениях 1,5–4,0 дБ. (*Соответствует **п. 15** специальности 2.2.13 Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем, включая системы и устройства аналогового и цифрового телевидения и оптико-электронных устройств).*

3. Алгоритм создания нейросетевой модели полосковых переключателей, основанный на формировании обучающей выборки методом латинского гиперкуба и обучении многослойной нейронной сети, являющийся универсальным и не требующий дополнительной модернизации при смене типа устройства, что подтверждено на ёмкостном МЭМС-переключателе и PIN-диодном переключателе с открытым шлейфом при сокращении времени расчёта в несколько раз. (*Соответствует **п. 14 специальности 2.2.13** Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем, включая системы цифрового телевидения высокой, сверхвысокой, ультравысокой четкости и других форматов, для телевизионного вещания и специальных применений).*

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием проверенного математического аппарата теории радиочастотных цепей и электродинамики, строгой аргументацией физических процессов в ключевых элементах. Достоверность предложенных подходов подтверждается хорошим совпадением результатов расчёта по разработанным математическим моделям с данными натурных измерений изготовленных макетов переключателей, а также совпадением результатов нейросетевого моделирования с результатами полноволнового электродинамического моделирования в среде ANSYS HFSS.

Практическая значимость и научная ценность результатов. Разработанный обобщённый алгоритм матричного анализа обеспечивает сокращение вычислительных затрат при анализе полосковых переключателей, а модернизированный алгоритм многопараметрической оптимизации позволяет повысить его эффективность. Разработанные аппроксимационные нейросетевые модели обеспечивают ускоренное прогнозирование характеристик полосковых переключателей, позволяя сократить время расчёта в несколько раз при средней по совокупности выходных параметров погрешности (MAPE) не более 3 % по сравнению с электродинамическим моделированием. Созданное программное обеспечение (подтверждено 8 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ) применимо в инженерной практике при проектировании полосковых переключателей и герконовых модулей.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены в

ООО «HTR Технологии» (Социалистическая Республика Вьетнам) и в РГРТУ им. В. Ф. Уткина при изучении дисциплины "Антенны и СВЧ-устройства" студентами направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (разработаны методические указания).

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 5 международных и 5 всероссийских научно–технических конференциях:

1. V Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022» (г. Рязань, 02–04 марта 2022 г.);
2. VII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (г. Рязань, 21–23 ноября 2022 г.);
3. XXVII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 07–09 декабря 2022 г.);
4. VI Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023» (г. Рязань, 01–03 марта 2023 г.);
5. XXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 22–24 ноября 2023 г.);
6. VIII Всероссийская научно–техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (г. Рязань, 27–30 ноября 2023 г.);
7. VII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024» (г. Рязань, 04–06 марта 2024 г.);
8. XXIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 27–29 ноября 2024 г.);
9. VIII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025» (г. Рязань, 03–06 марта 2025 г.);
10. IX Международная научно-практическая конференция «Современные исследования: перспективы и вызовы» (г. Москва, 24 декабря 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК к опубликованию основных научных результатов диссертаций, 10 статей в изданиях, индексируемых РИНЦ и 3 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях, 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и

методические указания к практическим и лабораторным занятиям.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал изложен на 156 страницах, включает 34 рисунка и 16 таблиц, а также 2 приложения. Список использованной литературы содержит 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена степень её проработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость полученных результатов, приведены данные об апробации работы, сведения о публикациях, структуре и объёме работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопросов математического моделирования и систем проектирования полосковых переключателей радиотехнических систем.

Выполнен систематический анализ основных типов элементной базы коммутационных структур (герконовые модули, полупроводниковые переключатели на основе PIN-диодов, полевых транзисторов с барьером Шоттки, МЭМС-переключатели). Показано, что для повышения точности расчета характеристик необходима разработка новых аналитических и эквивалентных моделей данных базовых элементов.

Проведен критический анализ численных методов электродинамики (MoM, FEM, FDTD – метод конечных разностей во временной области) и существующих систем электродинамического и схемотехнического моделирования. Выявлена необходимость совершенствования алгоритмов матричного анализа и многопараметрической оптимизации для эффективного проектирования сложных коммутационных устройств.

Установлено, что применение строгих полноволновых методов сопряжено с неприемлемо высокими вычислительными затратами при многовариантном синтезе. Для преодоления этого барьера обоснована целесообразность интеграции методов машинного обучения (искусственных нейронных сетей) в традиционный маршрут проектирования с целью создания высокоскоростных аппроксимационных моделей.

Во второй главе предложен обобщённый алгоритм матричного анализа и моделирования полосковых переключателей радиотехнических систем на основе теории многополюсников, а также разработаны математические модели ключевых электромагнитных и полупроводниковых элементов.

Обобщенная схема полоскового переключателя, охватывающая широкий класс коммутационных структур, представлена на рис. 1. Она состоит из произвольно соединенных базовых четырех- и восьмиполюсников. Обобщенный алгоритм базируется на последовательном «сворачивании»

базовых ветвей и восьмиполюсников в эквивалентные четырехполюсники путем тождественных преобразований комплексных матриц. В результате формируется обобщенная матрица передачи всего устройства:

$$\mathbf{A}_{\Sigma} = \mathbf{A_1} \dots \mathbf{A}_b \dots \mathbf{A_c} \dots \mathbf{A_d} \dots \mathbf{A_e} \dots \mathbf{A_f} \dots \mathbf{A_h} \dots \widehat{\mathbf{A}}_{\mathbf{p}} \dots \widehat{\mathbf{A}}_{\mathbf{r}} \dots \widehat{\mathbf{A}}_{\mathbf{s}} \dots \mathbf{A_k} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}.$$

В отличие от классических универсальных алгоритмов, требующих формирования и решения СЛАУ высоких порядков с вычислительной сложностью $O(N^3)$ (метод Гаусса), предложенный обобщённый алгоритм оперирует матрицами размерности не выше 2×2 и обладает вычислительной сложностью O(N), что обеспечивает мгновенный учёт граничных условий на зажимах и существенное повышение быстродействия расчётов.

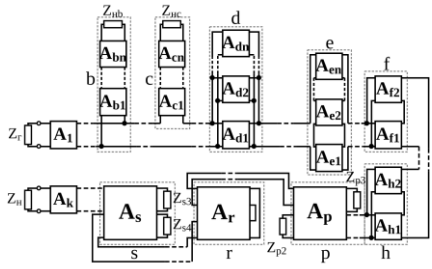


Рисунок 1 − Обобщенная схема полоскового переключателя, состоящая из произвольно соединенных четырех- и восьмиполюсников

На базе данного алгоритма разработана аналитическая модель герконового модуля (ГМ) в приближении Т-волны, реализованного в виде отрезка коаксиальной нерегулярной линии. Эквивалентная схема разомкнутого электромеханического элемента приведена на рис. 2.

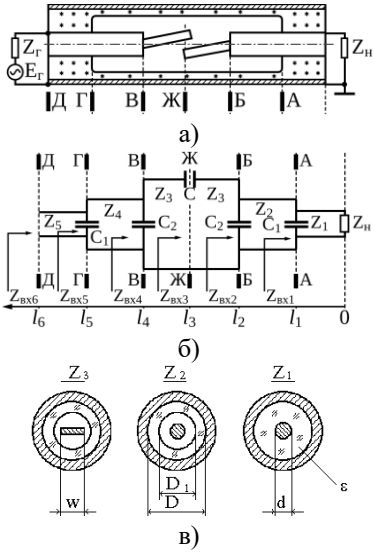


Рисунок 2 − Эквивалентная схема разомкнутого ГМ

Результирующая матрица передачи разомкнутого ГМ с учётом ёмкостных неоднородностей записывается в виде:

$$\mathbf{A}_{\Sigma} = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_{c1}\mathbf{A}_2\mathbf{A}_{c2}\mathbf{A}_3\mathbf{A}_c\mathbf{A}_4\mathbf{A}_{c2}\mathbf{A}_5\mathbf{A}_{c1}\mathbf{A}_6,$$

где $\mathbf{A}_i$ $\left(i = \overline{1,\dots,6}\right)$ – матрицы передачи отрезков однородных коаксиальных линий; $\mathbf{A}_c$ – матрица передачи последовательной емкости с разомкнутыми контакт-деталями; $\mathbf{A}_{c1}$, $\mathbf{A}_{c2}$ – матрицы параллельных емкостей в местах скачкообразного изменения импеданса. При анализе в замкнутом состоянии матрица $\mathbf{A}_c$ отсутствует.

Для полупроводниковых элементов (PIN-диодов и транзисторов) по-

лучены физические модели и эквивалентные схемы, обеспечившие строгую связь геометрических параметров с электрическими характеристиками.

Для объективного сопоставления полупроводниковых ключевых элементов различной физической природы предложено использование обобщённого интегрального фактора качества K_k, учитывающего волновой характер физических процессов. Показатель K_k применяется в диапазоне физически реализуемых значений R_1, R_2, ограниченных электрофизическими параметрами структуры, и используется исключительно для сопоставления конструкций, уже удовлетворяющих техническому заданию по обоим рабочим режимам.

Данный показатель выражается через активные (R_1, R_2) и реактивные (X_1, X_2) составляющие комплексных импедансов структуры Z_1 и Z_2 в двух крайних состояниях в режимах пропускания и запирания:

$$K_k = \sqrt{\frac{|Z_1 - Z_2|^2}{R_1 R_2}}.$$

Полупроводниковые ключевые элементы (PIN и ПТШ) описаны с использованием дрейф-диффузионной модели и электрофизических параметров структуры. Фактор качества для ключевых элементов (КЭ) на ПТШ определяется соотношением:

$$K_k = \frac{2qN_{\text{d}}\mu_{\text{n}}a}{\pi^2 f \varepsilon_{\text{a}}}\left[\left(\frac{\ell_{\text{з}}}{1-\sqrt{U_{\text{bi}}/U_{\text{a}}}} - 2a\sqrt{\frac{U_{\text{bi}}}{U_{\text{a}}}} + 4\ell_{\text{зи}} + \sqrt{qN_{\text{d}}\mu_{\text{n}}a\rho_{\text{k}}}\left(\ell_{\text{с}} + \ell_{\text{и}}\right)\text{cth}\sqrt{\frac{1}{qN_{\text{d}}\mu_{\text{n}}a\rho_{\text{k}}}}\right)\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\left(4\ell_{\text{зи}} - 2a + \sqrt{qN_{\text{d}}\mu_{\text{n}}a\rho_{\text{k}}}\left(\ell_{\text{с}} + \ell_{\text{и}}\right)\text{cth}\sqrt{\frac{1}{qN_{\text{d}}\mu_{\text{n}}a\rho_{\text{k}}}}\right)\right]^{-1/2},$$

где q – заряд электрона; N_{d} – концентрация примесей; μ_{n} – подвижность электронов; a – толщина активного n – слоя; U_{bi} – встроенный потенциал (контактная разность потенциалов); U_{a} – пороговое напряжение, при котором ток стока падает практически до нуля; ρ_{k} – удельное сопротивление омического контакта; $\ell_{\text{с}}, \ell_{\text{и}}, \ell_{\text{з}}$ – длина стока, истока и затвора соответственно, $\ell_{\text{зи}}$ – расстояние затвор-исток, ε_{a} – диэлектрическая проницаемость активного n–слоя.

Фактор качества КЭ на основе PIN-структур определяется соотношением:

$$K_k = \sqrt{\frac{\left|\left(R_1 - R_2\right) + j\left(X_1 - X_2\right)\right|^2}{R_1 R_2}} = \sqrt{\frac{\left(R_1 - R_2\right)^2 + \left(X_1 - X_2\right)^2}{R_1 R_2}} = \sqrt{\frac{A}{B}},$$

где:

$$A=\left\{\frac{4KTsh\left(\frac{W_{\text{i}}}{2\ell_0}\right)\left[tg^{-1}\left(\exp\frac{W_{\text{i}}}{2\ell_0}\right)-\frac{\pi}{4}\right]}{qI_{\text{мд}}\exp\left(U_{\text{д}}q/KT\right)}-\frac{W_{\text{i}}^2}{\left(\omega\varepsilon_{\text{a}}S\right)^2R_{\text{i}}^-}\right\}^2+\frac{W_{\text{i}}^2}{\left(\omega\varepsilon_{\text{a}}S\right)^2};$$

$$B=\left\{r_s+\frac{4KTsh\left(\frac{W_i}{2\ell_0}\right)\left[tg^{-1}\left(\exp\frac{W_i}{2\ell_0}\right)-\frac{\pi}{4}\right]}{qI_{\text{мд}}\exp\left(U_{\text{д}}q/KT\right)}\right\}\left[r_s+\frac{W_i^2}{\left(\omega\varepsilon_a S\right)^2R_{\text{i}}^-}\right],$$

R_{i}^- – сопротивление i -слоя при обратном смещении; K – постоянная Больцмана; T – температура диода; W_{i} – толщина i -слоя; $\ell_0=\sqrt{D_0\tau_0}$ – биполярная диффузионная длина; D_0 – биполярный коэффициент диффузии; τ_0 – время жизни носителей зарядов; $I_{\text{мд}}$ – амплитудное значение тока через диод; $U_{\text{д}}$ – напряжение, прикладываемое к диоду; S – площадь структуры, r_s – сопротивление потерь в низкоомном полупроводнике и металле.

Таким образом, полученные аналитические зависимости импедансов Z_1, Z_2 и обобщённый фактор качества обеспечивают объективное сопоставление полупроводниковых ключевых элементов различной физической природы по контрасту их импедансов в режимах пропускания и запирания, что важно для обоснованного выбора элементной базы полосковых коммутационных структур.

Совокупность разработанных обобщенных матричных моделей, включая аналитическую модель герконового модуля в приближении Т-волны, и физических моделей полупроводниковых элементов формирует единый подход к анализу современных полосковых коммутационных структур, что обеспечивает надежную базу для алгоритмов многопараметрической оптимизации и нейросетевого моделирования, рассматриваемых в третьей главе.

В третьей главе разработаны алгоритм многопараметрической оптимизации полосковых переключателей и универсальный алгоритм создания нейросетевой модели, обеспечивающие повышение точности и быстродействия решения проектных задач.

Структурная схема алгоритма многопараметрической оптимизации (рис. 3) реализует взаимодействие пяти основных блоков: управления (1), синтеза (2), анализа электрических параметров (3), динамически компонуемой библиотеки базовых и ключевых элементов (4) и оптимизации (5). В основу алгоритма положены метод Пауэлла, метод квадратичной аппроксимации линейного минимума, обобщённая

матричная модель переключателей (блоки 1–4) и аддитивная целевая функция, учитывающая два режима функционирования (пропускания и запирания):

$$F = \sum_{i=1}^{p} \left\{ a_i Y_1^+(f_i) + b_i \left[\Delta_Y - Y_1^-(f_i) \right]^2 + c_i \left[Y_2^+(f_i) - 1 \right]^2 + d_i \left[Y_2^-(f_i) - 1 \right]^2 \right\},$$

где $Y_1^+(f_i)$, $Y_1^-(f_i)$ – функции рабочего затухания в режиме пропускания и запирания соответственно; $Y_2^+(f_i)$, $Y_2^-(f_i)$ – функции коэффициентов стоячей волны в режиме пропускания и запирания соответственно; a_i, b_i, c_i, d_i – весовые коэффициенты; Δ_Y – величина заведомо большая $Y_1^-(f_i)$.



Рисунок 3 – Структурная схема оптимизации полосковых переключателей

Введение аддитивной целевой функции и уточнённых аналитических выражений для ключевых элементов обеспечивает существенное повышение точности оптимизации полосковых переключателей по сравнению с известными методами.

Для преодоления вычислительного барьера полноволнового моделирования предложен универсальный алгоритм построения аппроксимирующей модели на основе многослойной искусственной нейронной сети (рис. 4). В отличие от известных подходов, в которых нейросетевые модели разрабатываются индивидуально для каждого типа устройства, предложенный алгоритм не зависит от типа переключателя и физического механизма коммутации.

Задача нейросетевого моделирования сводится к аппроксимации отображения f: $R^n \rightarrow R^m$ между вектором конструктивных параметров переключателя $x \in R^n$ (ширина и длина линий, толщина подложки, параметры мембраны/PIN-структуры и др.) и вектором выходных характеристик $y \in R^m$ (S-параметры, КСТu , экстремальные значения коэффициентов отражения и развязки и соответствующие им резонансные частоты).

Алгоритм состоит из 12 этапов, объединённых в три блока. В подгото-

вительном блоке (этапы 1–5) формулируется техническое задание, выполняется синтез конструкции и проводится верификация комбинированными методами электродинамического моделирования в ANSYS HFSS и схемотехнического расчёта в AWR Microwave Office.

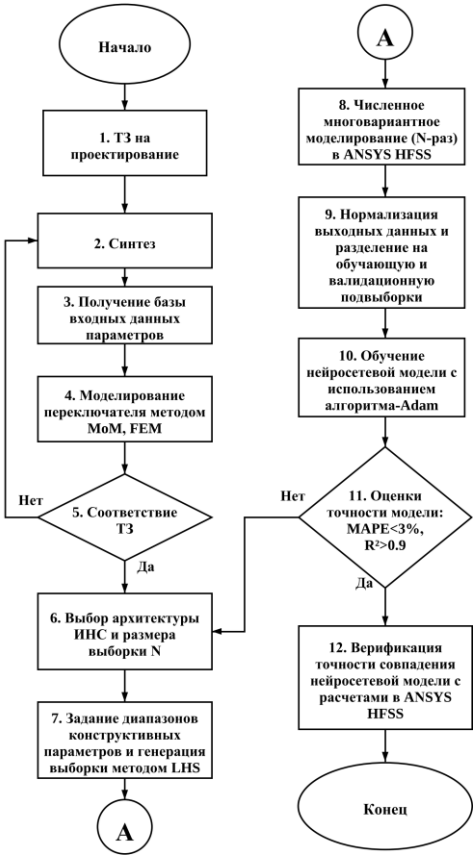
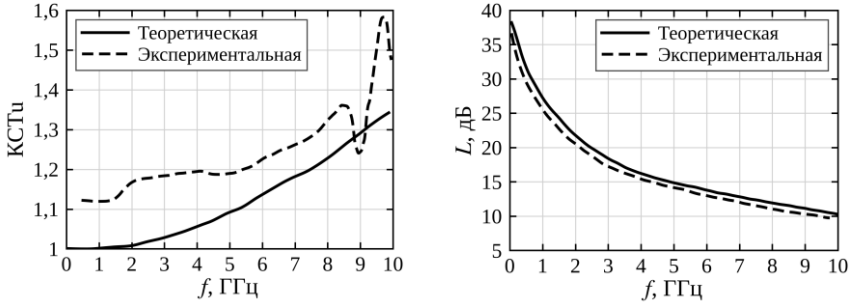


Рисунок 4 – Схема алгоритма создания нейросетевой модели полосковых переключателей

В блоке формирования исходной выборки (этапы 6–9) выбирается архитектура искусственной нейронной сети (ИНС), генерируются комбинации конструктивных параметров методом латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling, LHS), выполняется автоматизированное многовариантное моделирование в HFSS через интерфейс PyAEDT, проводится нормализация данных и разделение на обучающую (80 %) и валидационную (контрольную, 20 %) подвыборки. В блоке создания и верификации модели (этапы 10–12) осуществляется обучение нейронной сети алгоритмом Adam с функцией активации ReLU и функцией потерь MSE, оценка точности по критериям средней абсолютной процентной ошибки (MAPE < 3 %) и коэффициента детерминации (R^2 > 0,9), финальная верификация предсказаний путём сравнения с независимым моделированием в HFSS.

Обоснование выбора архитектуры (три скрытых слоя 16×16×16) приведено в главе 4.

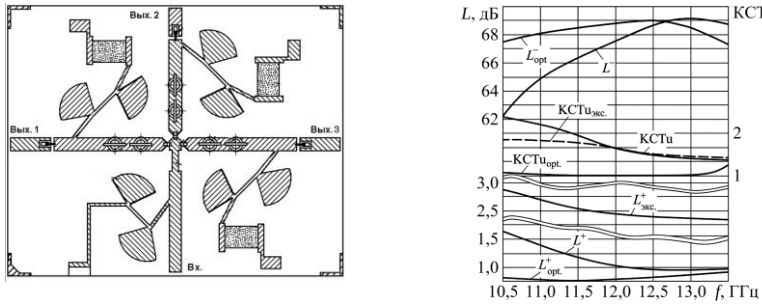
В четвертой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предложенных моделей. Проведено исследование герконового модуля. Экспериментальные данные подтвердили адекватность аналитической модели в диапазоне частот до 10 ГГц. Графики частотных зависимостей представлены на рис. 5.



а) б)

Рисунок 5 – Теоретические и экспериментальные зависимости коэффициента стоячей волны (КСТu) и величины затухания (L) ГМ от частоты: а – при замыкании контакт-деталей; б – при размыкании контакт-деталей

Проведены теоретические и экспериментальные исследования конструктивно-топологических вариантов полосковых трех- и четырехканальных полупроводниковых переключателей. Топологии и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) данных многоканальных структур представлены на рис. 6 и рис. 7.



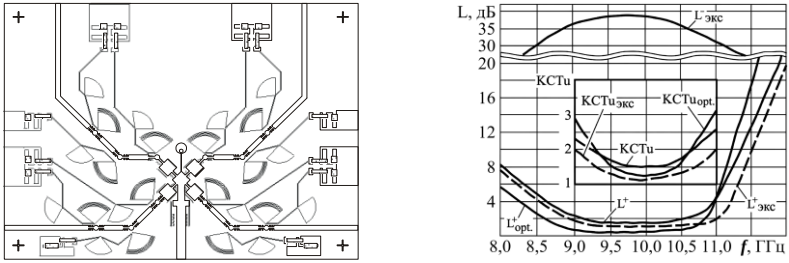
а) б)

Рисунок 6 – Топология и АЧХ трехканального полоскового переключателя

В результате оптимизации трехканального переключателя на центральной частоте 12 ГГц рабочее затухание в режиме пропускания снизилось на 28 % и составило 0,76 дБ. Для наиболее сложного четырехканального переключателя в полосе частот 2 ГГц (20 %) с центральной частотой 10 ГГц экспериментально подтверждена адекватность модели: потери в режиме пропускания составили не более 1,8 дБ (при расчётных 1,5–4,0 дБ), развязка в режиме запирания – не менее 30 дБ, а КСТu – не более 2,0.

Далее универсальность предложенного нейросетевого алгоритма верифицирована на ёмкостном МЭМС-переключателе. Формирование ис-

ходной выборки осуществлялось методом латинского гиперкуба (N=1000), электродинамическое моделирование проводилось в HFSS через интерфейс PyAEDT.



а) б)

Рисунок 7 – Топология и АЧХ четырехканального полоскового переключателя

По результатам сравнения шести конфигураций сети (от одного до трёх скрытых слоёв по 8 и 16 нейронов) обоснован выбор архитектуры 16×16×16, обеспечившей при обучении алгоритмом Adam наилучшую точность на валидационной подвыборке: R^2 = 0,9085 и MAPE = 1,15 %. Диаграммы рассеяния приведены на рис. 8.

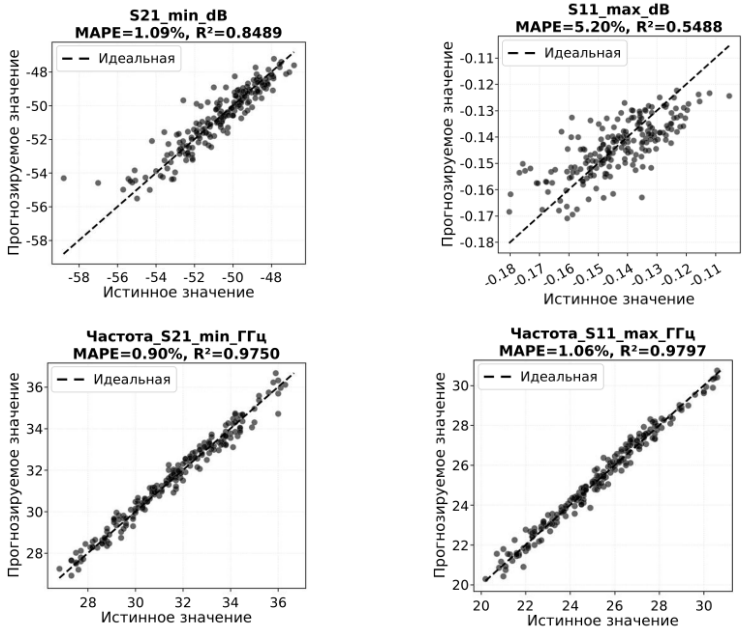


Рисунок 8 – Диаграммы рассеяния предсказанных и истинных значений выходных параметров в режиме запирания МЭМС-переключателя

Верификация на девяти независимых тестовых образцах подтвердила точность предсказания резонансных частот МЭМС-переключателя со средней погрешностью около 1,3 %. Исследование алгоритма на PIN-диодном переключателе с открытым шлейфом (при объёме выборки N = 975) показало высокую точность аппроксимации на валидационной подвыборке: R^2 = 0,9684 и MAPE = 2,98 % (рис. 9); средняя погрешность предсказания резонансных частот на девяти независимых тестовых образцах составила около 1,7 %.

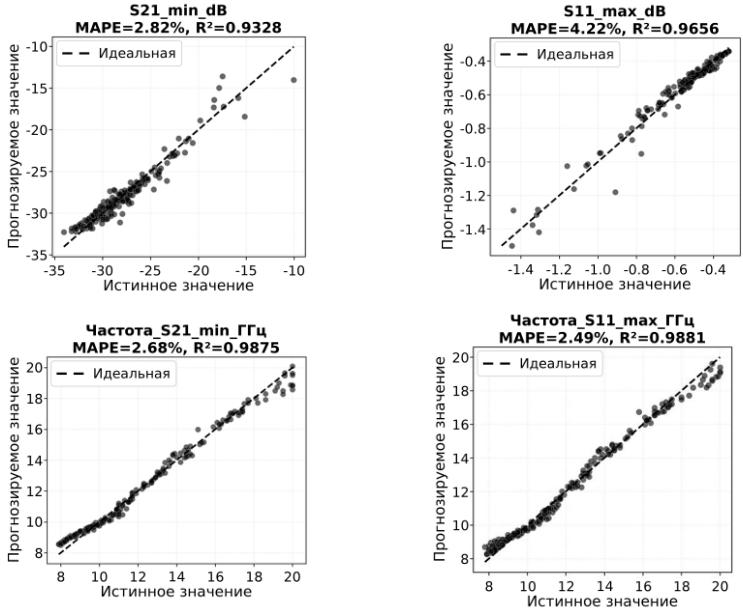


Рисунок 9 – Диаграммы рассеяния предсказанных и истинных значений выходных параметров в режиме запирания PIN-диодного переключателя

Показано, что использование нейросетевой модели сокращает время многовариантного расчёта в несколько раз по сравнению со строгим полноволновым моделированием.

В заключении приводятся результаты диссертации, подтверждающие основные положения, выносимые на защиту:

1. Усложнение структуры и функциональных возможностей полосковых переключателей приводит к значительному возрастанию временных затрат и снижению оперативности решения проектных задач. Поэтому разработка моделей и алгоритмов полосковых переключателей является актуальной задачей для оперативного проектирования и оптимизации.

2. Разработаны математические модели ключевых электромагнитных

и полупроводниковых элементов, предложен алгоритм анализа и оптимизации герконовых модулей, получены аналитические зависимости для полупроводниковых ключевых элементов. Эти модели обеспечили связку «геометрия → электрические характеристики» и подготовили исходные данные для анализа и оптимизации переключателей.

3. Разработан алгоритм многопараметрической оптимизации полосковых переключателей на основе матричной модели переключателей, учитывающей модернизированные аналитические выражения ключевых элементов и аддитивную целевую функцию для двухрежимного функционирования переключателей.

4. Разработаны конструктивно-технологические решения герконовых переключателей, позволяющие получить потери в режиме пропускания менее 0,1 дБ в дециметровом диапазоне при числе срабатываний 10^7, с расширением рабочего диапазона до 10 ГГц. Также разработаны переключатели на PIN-диодах и ПТШ; для наиболее сложного варианта – четырехканальный PIN-диодный переключатель – в полосе частот 2 ГГц на центральной частоте 10 ГГц экспериментальные потери пропускания составили не более 1,8 дБ (при теоретических значениях 1,5–4,0 дБ), запирания – не менее 30 дБ и КСТu не более 2,0, что подтверждает адекватность полученных алгоритмов.

5. Разработан и верифицирован универсальный алгоритм создания нейросетевой модели полосковых переключателей, обеспечивающий среднюю по совокупности выходных параметров погрешность аппроксимации MAPE не более 3 % при коэффициенте детерминации R^2 более 0,9 и сокращении времени расчёта в несколько раз. Универсальность алгоритма подтверждена на ёмкостном МЭМС-переключателе (R^2 = 0,9085, MAPE = 1,15 %) и PIN-диодном переключателе с открытым шлейфом (R^2 = 0,9684, MAPE = 2,98 %) при единой архитектуре многослойной нейронной сети с тремя скрытыми слоями (16×16×16), что позволяет рекомендовать его в качестве типового подхода к созданию нейросетевых моделей полосковых переключателей различных типов.

В приложении содержатся титульные листы свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х**., Лыу Т. Д**.** Полосовой фильтр на связанных микрополосковых линиях с двумя секторными резонаторами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021 г. №75. С.15–23.

2. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Анализ численными методами конструктивных вариантов миниатюрных радарных резонансных элементов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023 г. №84. С.3–14.

3. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Моделирование электромагнитных ключевых элементов в микроволновом диапазоне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025 г. №92. С.13–24.

4. **Нгуен Д. Х.,** Васильев Е. П. Алгоритм создания нейросетевой модели на примере полоскового МЭМС-переключателя // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2026 г. № 95. С.27–40.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

5. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа оптимизации параметров микроволновых выключателей и переключателей методом Пауэлла: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024661161. – Зарегистр. 02.05.2024; опубл. 16.05.2024 – Яз. программирования: Delphi. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

6. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа оптимизации параметров микроволновых переключателей на основе глубокой нейронной сети с двумя скрытыми слоями: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2025685052. – Зарегистр. 08.08.2025; опубл. 19.09.2025 – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

7. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа оптимизации параметров микроволновых переключателей на основе глубокой нейронной сети с пятью скрытыми слоями: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2025685049. – Зарегистр. 08.08.2025; опубл. 19.09.2025 – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

8. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа автоматизированного сбора данных из программного комплекса ANSYS HFSS для обучения искусственных нейронных сетей: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2026613752. – Зарегистр. 17.02.2026; опубл. 17.02.2026. – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

9. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа предварительной обработки и нормализации данных S-параметров полосковых переключателей для обучения искусственных нейронных сетей: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2026614659. – Зарегистр. 17.02.2026; опубл. 17.02.2026. – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

10. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа визуализации и анализа производительности искусственных нейронных сетей для моделирования S-параметров полосковых переключателей: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2026614660. – Зарегистр. 17.02.2026; опубл. 17.02.2026. – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

11. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа прогнозирования S-параметров полосковых переключателей с использованием искусственной

нейронной сети: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2026618170. – Зарегистр. 24.03.2026; опубл. 24.03.2026. – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

12. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Программа сравнительного анализа результатов прогнозирования искусственной нейронной сети и моделирования в ANSYS HFSS: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2026613724. – Зарегистр. 17.02.2026; опубл. 17.02.2026. – Яз. программирования: Python. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

Учебно-методическая работа

13. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Моделирование микроволновых структур в среде High Frequency Structural Simulator: методические указания к практическим и лабораторным занятиям // Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, 2024. 34 с.

Статьи в сборниках научных трудов и тезисы докладов конференций

14. Васильев Е. П., **Нгуен Д.Х.** Моделирование микрополосковой антенны с высокой направленностью для применения в X–диапазоне// Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2022: сборник трудов V международного научно–технического форума: в 10 т. Рязань, 2022 г. Т.6. С.37–43.

15. **Нгуен Д. Х.** Математическое моделирование и исследование микрополосковых антенн для космических аппаратов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVII Всероссийской научно–технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов; Рязань: РГРТУ, 2022 г. С.150–152.

16. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Алгоритм проектирования миниатюрных антенн // Материалы VII Всероссийской научно–технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2022 г. С.84–93.

17. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Анализ САПР радиоэлектронных средств. Особенности и критерии оценки // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2023: сборник трудов VI международного научно–технического форума: в 10 т. Рязань, 2023 г. Т.6. С.10–14.

18. **Нгуен Д. Х.** Анализ и многопараметрическая оптимизация коммутируемых микроволновых устройств// Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVIII Всероссийской научно–технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов; Рязань: РГРТУ, 2023 г. С.219–220.

19. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Анализ в пространственно–временной области микроволновых волноведущих структур с использованием запаздывающих потенциалов // Материалы VIII Всероссийской научно–технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2023 г. С.412–418.

20. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.,** Лыу Т. Д. Микроволновые сумматоры – делители мощности // Материалы VIII Всероссийской научно–технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2023 г. С.418–424.

21. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Алгоритм оптимизации микроволновых переключателей методом Пауэлла // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2024: сборник трудов VII международного научно–технического форума: в 10 т. Рязань, 2024 г. Т.6. С.6–12.

22. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Оптимизация переключателей с учетом интегральных критериев качества // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2024: сборник трудов VII международного научно–технического форума: в 10 т. Рязань, 2024 г. Т.6. С.57–63.

23. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Метод параметрического синтеза переключателей // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2024: сборник трудов VII международного научно–технического форума: в 10 т. Рязань, 2024 г. Т.6. С.64–68.

24. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Аналитические модели микроволновых полупроводниковых ключевых элементов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всероссийской научно–технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов; Рязань: РГРТУ, 2024 г. С.201–203.

25. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.** Применение методов и алгоритмов оптимизации для моделирования МЭМС–переключателей // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2025: сборник трудов VIII международного научно–технического форума: в 10 т. Рязань, 2025 г. Т.6. С.130–137.

26. Васильев Е. П., **Нгуен Д. Х.,** Лыу Т. Д. Моделирование управляющих устройств радиотехнических систем // Современные исследования: перспективы и вызовы: сборник статей IX Международной научно-практической конференции. – Москва: Международный центр «Новые научные исследования». – 2025. С.67–80.

НГУЕН ДАНГ ХОП

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО АНАЛИЗА И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . . 26. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ_____
Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В. Ф. Уткина.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно–издательский центр РГРТУ.