На правах рукописи



ЛЫУ ТХАНЬ ДАТ

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ

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».

Научный руководитель	**Васильев Евгений Петрович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры космических технологий ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань
Официальные оппоненты:	**Приоров Андрей Леонидович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры цифровых технологий и машинного обучения ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль.
	Гаврилов Константин Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» 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 14 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 диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» или на сайте http://www.rsreu.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стремительное развитие радиотехнических систем, включая системы и устройства телевидения, а также переход в радиочастотные диапазоны предъявляют повышенные требования к полосковым фильтрам. Эти устройства являются ключевыми элементами приемо-передающих модулей в системах связи и космического телевидения. Традиционные электродинамические методы моделирования требуют значительных вычислительных затрат и не учитывают влияние дестабилизирующих факторов.

Поэтому актуальным является создание алгоритмов, учитывающих влияния потерь, дисперсии, многослойности и шероховатости проводников, а также алгоритмов нейросетевого и вероятностного моделирования, позволяющих повысить точность расчетов при существенном сокращении временных затрат на прогнозирование основных характеристик полосковых фильтров на связанных линиях (СЛ).

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в развитие теории полосковых фильтров внесли такие учёные, как В.В. Никольский, З.Ю. Готра, К. Гупта, А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов, D.M. Pozar, В.В. Григорьев, В.М. Эйдельман. Проектирование полосковых фильтров приведено в работах В.П. Орлова, В.Г. Феоктистова, В.М. Красноперкина, Г.С. Самохина, A. Kirilenko, V. Tkachenko, J.S. Hong, D.G. Swanson, W.J.R. Hoefer, C.Y. Liu, T. Jiang, Y.S. Li. Вероятностное моделирование полосковых фильтров приведено в работах В.П. Смирнова, В.И. Васильева, Е.П. Васильева, А.И. Орлова, Б.В. Сильвермана, M.P. Wand, S.J. Sheather. Нейросетевое моделирование полосковых фильтров представлено в работах Q.J. Zhang, V.K. Devabhaktuni, V.S. Kushwah, F.M. Sharma, G.S. Tomar, J.E. Rayas-Sanchez, F. Feng и др.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка эффективных алгоритмов моделирования для полосковых фильтров радиотехнических систем, а также улучшение их основных показателей качества за счет разработки новых математических моделей, алгоритмов и программных средств на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) и учета вероятностного характера моделей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать математическую модель радиотехнических фильтров с учетом потерь, дисперсии, многослойности и шероховатости проводящей поверхности.
2. Разработать алгоритм вероятностного моделирования фильтров на основе метода ядерных оценок.
3. Разработать алгоритм проектирования радиотехнических фильтров с использованием искусственной нейронной сети. Алгоритм должен обес-

печивать прогнозирование основных характеристик (S-параметров) на основе входных данных с минимальными вычислительными затратами.

4. Провести сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и измерительных экспериментов.

Объектом исследования диссертационной работы являются полосковые фильтры радиотехнических систем.

Предмет исследования – алгоритмы моделирования полосковых фильтров радиотехнических систем с использованием искусственных нейронных сетей и вероятностных подходов.

Методы исследования. Теоретические методы базируются на теории фильтров и теории вероятностей. В работе также сочетались теоретические исследования, машинный эксперимент, натурные исследования макетных образцов, с последующим внедрением разработанных устройств и программ, чем подтверждалась достоверность полученных результатов.

Научная новизна заключается в получении следующих результатов:

1. Разработана математическая модель радиотехнических фильтров на СЛ, отличающаяся от известных одновременным учетом потерь в проводниках и диэлектрике, дисперсии, многослойности и шероховатости проводящей поверхности. *(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. Впервые предложен алгоритм вероятностного моделирования полосковых фильтров на основе метода ядерных оценок плотности распределения выходных параметров, отличающийся от известных возможностью точного прогнозирования основных статистических характеристик при малой выборке. *(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.)*

3. Предложен алгоритм создания нейросетевой модели фильтра, не зависящий от конкретной топологии, отличающийся от известных подходов, в которых нейросетевые модели разрабатываются индивидуально для каждого типа устройства. *(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.)*

Практическая значимость работы: Предложенные модели, алгоритмы и программы позволяют не только повысить качественный уровень

проектирования полосковых фильтров радиотехнических систем, но и обеспечивают их вероятностное и нейросетевое моделирование.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены:

- в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» в программах бакалавриата и магистратуры по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», в курсе «Устройства СВЧ и антенны», что подтверждено методической разработкой «Моделирование селективных устройств: методические указания к практическим и лабораторным занятиям / Рязанский государственный радиотехнический университет; сост.: Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу. Рязань, 2024. 32 с.» и актом внедрения;
- в разработки компании ООО «электронные технологии и торговля E-STARS». Внедрения подтверждены соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель фильтров, учитывающая дисперсию электрических характеристик, потери в полосковых линиях, многослойность и шероховатость проводников, которая позволяет повысить адекватность модели, оцениваемую максимальным расхождением экспериментальных и теоретических данных не более ±0,3 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.)*
2. Алгоритм вероятностного моделирования фильтров на основе метода ядерных оценок плотности распределения выходных параметров, обеспечивающий непараметрическую сглаженную оценку выходных характеристик, что позволяет повысить точность и надежность прогнозирования основных статистических характеристик, с уменьшением интегрированной квадратичной ошибки в 2,2 раза по сравнению с методом гистограмм. *(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.)*
3. Алгоритм создания нейросетевой модели фильтра, обеспечивающий адекватность прогнозирования коэффициента передачи S_{21} и отражения S_{11} со средней абсолютной процентной ошибкой 1% и сокращающий время симуляции в 16 раз. *(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.)*

Вклад автора в разработку проблемы. Все основные научные положения, выводы и рекомендации предложены соискателем, кроме того соискателем сформулированы основные идеи методов и алгоритмов.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 5 международных и 4 всероссийских научно-технических конференциях:

- 5-й Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022» (Рязань, 02 – 04 марта 2022 г.);
- 27-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 07 – 09 декабря 2022 г.);
- 6-й Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании − СТНО-2023» (Рязань, 01 – 03 марта 2023 г.);
- 28-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 22 – 24 ноября 2023 г.);
- 13-я Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 27 – 30 ноября 2023 г.);
- 7-й Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании − СТНО-2024» (Рязань, 04 – 06 марта 2024 г.);
- 29-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 27 – 29 ноября 2024 г.);
- 8-й Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании − СТНО-2025» (Рязань, 03 – 06 марта 2025 г.);
- 9-я Международная научно-практическая конференция «Современные исследования: перспективы и вызовы» (Москва, 24 декабря 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 24 работы, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 учебно-методическое пособие, 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 8 статей в изданиях, индексируемых РИНЦ, и 3 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка литературы. Материал изложен на 160 страницах, включает 52 рисунка и 5 таблиц, а также 2 приложения. Список использованной литературы содержит 142 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена степень проработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также отмечен личный вклад автора, приведены данные об апробации работы, сведения о публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе проведен обзор и анализ современного состояния методов и алгоритмов проектирования фильтров. Рассмотрено назначение фильтров в приемо-передающих модулях, их классификация по электрическим и конструктивно-технологическим признакам (полосковые, волноводные, сосредоточенные элементы и коаксиально-керамические резонаторы) с анализом достоинств и недостатков.

Проанализированы традиционные методы проектирования, подходы на основе машинного обучения и искусственных нейронных сетей для прогнозирования характеристик, а также вероятностное моделирование для учета влияния дестабилизирующих факторов. Сформулированы основные направления исследований и задачи для достижения поставленной цели в области радиотехники.

Во второй главе разработано математическое моделирование радиотехнических фильтров с учетом потерь, дисперсии, многослойности и шероховатостей.

В общем случае для получения обобщенной матрицы эквивалентного четырехполюсника – аналога фильтра, целесообразно воспользоваться методом цепных матриц. Операции над матрицами в этом случае сводятся, в основном, к перемножению комплексных матриц второго и четвертого порядков.

Для определения результирующей **A, S** или **T**-матрицы эквивалентного четырехполюсника используются классические матрицы передачи $\mathbf{A}_i$ и волновые матрицы передачи $\mathbf{T}_i$ k-элементарных четырехполюсников соединенных каскадно к которым рекомбинационными методами преобразуются сложные соединения:

$$\mathbf{A} = \prod_{i=0}^{k} \mathbf{A}_i; \qquad \mathbf{T} = \prod_{i=0}^{k} \mathbf{T}_i.$$

При этом **учет диссипативных потерь** реализуется через комплексные характеристические сопротивления одиночной $\dot{Z}_k$ и связанных $\dot{Z}_{ko(e)}$ для нечетного «о» и четного «е» типов возбуждения полосковых линий (ПЛ).

$$\dot{Z}_k = \left(\frac{L_0}{C_0}\right)^{1/2}\left[1 - j\left(\frac{R_0}{2\omega L_0} - \frac{G_0}{2\omega C_0}\right)\right] = Z\left[1 - j\left(\frac{1}{\beta}\frac{R_0}{2v_c L_0} - \frac{1}{\beta}\frac{G_0}{2v_c C_0}\right)\right] =$$

$$= Z\left[1 - j\left(\frac{\alpha_c}{\beta} - \frac{\alpha_d}{\beta}\right)\right],$$

$$\dot{Z}_{ko(e)} = Z_{o(e)}\left[1 - j\left(\frac{\alpha_{co(e)}}{\beta_{o(e)}} - \frac{\alpha_{do(e)}}{\beta_{o(e)}}\right)\right];$$

где R_0, G_0, L_0, C_0 – погонные сопротивления, проводимость, индуктивность и емкость соответственно; α_c, α_d – погонные потери в проводнике и диэлектрике для одиночной ПЛ; $\alpha_{co(e)}$ $\alpha_{do(e)}$ – погонные потери в проводнике и диэлектрике при нечетном «о» и четном «е» типе возбуждения; $\beta_{o(e)}$ – фазовая постоянная для связанных линий.

Учет влияния дисперсии осуществим по следующим соотношениям для частотно-зависимой эффективной диэлектрической проницаемости.

Для одиночной ПЛ:

$$\varepsilon_f = \varepsilon - \frac{\varepsilon - \varepsilon_э}{1 + G\left(f^2 / f_p^2\right)},$$

где $f_p = \dfrac{Z}{2\mu h}$; $G \cong 0{,}6 + 0{,}009Z$ – эмпирическая функция; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; h – толщина подложки, Z – волновое сопротивление; $\varepsilon_э$ – эффективная диэлектрическая проницаемость; f – текущая частота.

Для связанных ПЛ:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon - \frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{1 + (0{,}6 + 0{,}0045Z_e)(f / f_{pe})^2};$$

$$\varepsilon_{fo} = \varepsilon - \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 + (0{,}6 + 0{,}018Z_0)(f / f_{po})^2},$$

где ε_{fe}, ε_{fo} – частотно-зависимые эффективные диэлектрические проницаемости при чётном и нечётном типах возбуждения; ε_e, ε_0 – эффективные диэлектрические проницаемости не зависящие от частоты; f_{pe}, f_{po} – f_p при чётном и нечётном типах возбуждения.

С целью **учета качества технологии изготовления полоскового проводника** при определении погонных потерь в проводниках α_c вводится понятие коэффициента потерь K_p, который даёт количественную оценку

степени влияния микронеровностей поверхности проводника на величину затухания.

$$K_p = 1 + k_\lambda \left(k_ш - 1\right),$$

где $k_\lambda = \text{th}\dfrac{R_a}{1,8d}$ – частотная поправка, зависящая от рабочей длины волны в полосковой линии; R_a – среднеарифметическое отклонение микропрофиля; d – глубина скин-слоя для адгезионной плёнки; $k_ш$ – коэффициент шероховатости (отношение длины микропрофиля к длине идеально гладкой поверхности).

Значение поверхностного сопротивления R_s токонесущих поверхностей возрастает в K_p раз.

Вещественная часть поверхностного сопротивления входящего в соотношения для двухслойной токонесущей поверхности, которая образуется при изготовлении ПЛ методами вакуумного осаждения определяется соотношением:

$$R_s = \frac{R_1\left(1+\dfrac{R_2}{R_1}\right)^2 \exp\left(\dfrac{4t}{d}\right) + 2\left[\left(\dfrac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right]\sin\left(\dfrac{2t}{d}\right) - \left(\dfrac{R_2}{R_1} - 1\right)^2}{\left(1+\dfrac{R_2}{R_1}\right)^2 \exp\left(\dfrac{4t}{d}\right) - 2\left[\left(\dfrac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right]\cos\left(\dfrac{2t}{d}\right)\exp\left(\dfrac{2t}{d}\right) + \left(\dfrac{R_2}{R_1} - 1\right)^2}.$$

где R_1 – удельное сопротивление адгезионного подслоя; R_2 – удельное сопротивление материала проводника; t – толщина адгезионного подслоя.

Таким образом, рассмотренные выше функции погонных потерь, входящие в матричные выражения с учетом R_s, позволят оценить влияние технологического процесса на выходные характеристики.

На рисунке 1 приведены основные этапы проектирования фильтров с учетом потерь, дисперсии, многослойности и шероховатости.

Шаг 1. Составление технического задания (ТЗ) на фильтр.

Шаг 2. Выбор конструктивно-технологического варианта фильтра.

Шаг 3. Синтез фильтра по заданной АЧХ с учетом конструктивно-технологических особенностей.

Шаг 4. Анализ фильтра по матричной модели с учетом дестабилизирующих факторов и полученных конструктивных параметров.

Шаг 5. Сравнение теоретической массогабаритных показателей и других с требованиями ТЗ.

Шаг 6. Измерение макетного образца.

Шаг 7. Сравнение экспериментальной АЧХ, массогабаритных показателей и других с требованиями ТЗ.

Шаг 8. Определение подстроек. Рекомендации на регламентные работы.

Шаг 9. Подготовка конструкторской документации на производство.

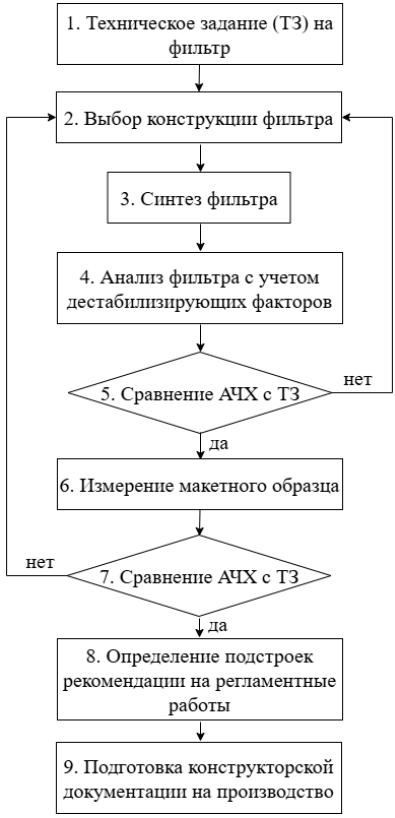


Рисунок 1 – Основные этапы проектирования фильтров с учетом потерь, дисперсии, многослойности и шероховатости

На рисунке 2 представлена АЧХ рабочего затухания $L(f)$: 1 – рассчитанная по матричной модели без учета потерь, дисперсии и шероховатости проводников; 2 – с учетом потерь и концевой емкости; 3 – по полученным в данной работе соотношениям с учетом концевой ёмкости; экспериментальные значения показаны точками.

Наилучшие результаты в полосе пропускания по уровню 2 дБ получены для кривой 3, максимальное расхождение экспериментальных и теоретических данных составило ±0,3 дБ.

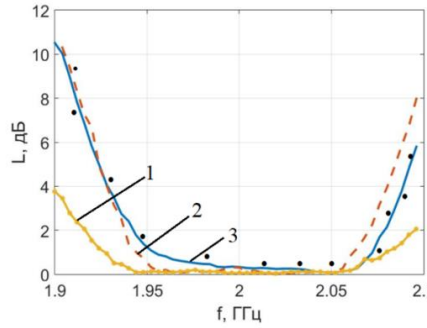


Рисунок 2 – Сравнительный анализ математических моделей ПФ на связанных полосковых линиях

В третьей главе рассмотрено вероятностное моделирование фильтров методом ядерных оценок плотности (ЯОП).

Систему выходных характеристик для произвольной конструкции фильтров представим в виде:

$$Y_m = \Psi_m(\bar{k}_s, f_i),\ m=\overline{1,n};\ s=\overline{1,c};\ i=\overline{1,p},$$

где n – число внешних АЧХ и ФЧХ; c – число состояний или режимов функционирования фильтров; p – число частотных точек на регулярной сетке $f_i \in Pf$; $\bar{k}_s$ – вектор электрических и конструктивных параметров.

Введем случайный вектор выходных характеристик $\tilde{\bar{\mathbf{Y}}} = (\tilde{Y}_1, ..., \tilde{Y}_n) \in \mathrm{R}^n$.

Пусть в процессе имитационного моделирования фильтров получена выборка $\tilde{Y}_1 = (\tilde{Y}_{11},...,\tilde{Y}_{1N})^T,...,\tilde{Y}_n = (\tilde{Y}_{n1},...,\tilde{Y}_{nN})^T$, которая состоит из N реализаций n-мерного случайного вектора $\tilde{\tilde{\mathbf{Y}}}$ с оценкой плотности распределения $f(\overline{Y})$, тогда:

$$f(\overline{Y}) = \frac{1}{N}\cdot\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{h(N)}\cdot K\left[\frac{Y_1-\tilde{Y}_{1i}}{h_1(N)},...,\frac{Y_n-\tilde{Y}_{ni}}{h_n(N)}\right],$$

где $h_1(N),...,h_n(N)$ – коэффициенты вклада, $K(\overline{\vartheta})$ – ядро, заданная непрерывная функция, $\overline{\vartheta} = (\vartheta_1,...,\vartheta_n) \in R^n$, $\vartheta_1 = \frac{Y_1-\tilde{Y}_{1i}}{h_1(N)},...,\ \vartheta_n = \frac{Y_n-\tilde{Y}_{ni}}{h_n(N)}$.

Ядро $K(\overline{\vartheta})$ должно удовлетворять следующим условиям:

$$K(\overline{\vartheta}) \ge 0;\ K(\overline{\vartheta}) = K(-\overline{\vartheta});\ \int_{-\infty}^{\infty} K(\overline{\vartheta})d\overline{\vartheta} = 1;\ \sup_{\overline{\vartheta}}\left|K(\overline{\vartheta}\right| = \infty;\ \int_{-\infty}^{\infty}\left|K(\overline{\vartheta})\right|d\overline{\vartheta} < \infty;$$

$$\lim_{\vartheta_i\to\infty}\left|\vartheta_i K(\overline{\vartheta})\right| = 0;\ \ i = \overline{1,n}.$$

Коэффициент вклада определим из выражения:

$$h(N) = \prod_{i=1}^{n} h_i(N),$$

Для мультипликативной формы ядра справедливо соотношение:

$$K(\overline{\vartheta}) = \prod_{i=1}^{n} K_i(\vartheta_i),$$

где $K_i(\vartheta_i)$ – одномерное ядро, функция, зависящая только от одной переменной – i-ой компоненты вектора $\overline{\vartheta}$.

Запишем первые моменты оценки (математическое ожидание $M\left[\hat{f}(\overline{Y})\right]$ и дисперсию $D\left[\hat{f}(\overline{Y})\right]$):

$$M\left[\hat{f}(\overline{Y})\right] = \int_{R^n} K(\overline{\vartheta})f(\overline{Y}-H_N\overline{\vartheta})d\overline{\vartheta};$$

$$D\left[\hat{f}(\overline{Y})\right] = \frac{1}{Nh(N)}\left\{\int_{R^n} K^2(\overline{\vartheta})f(\overline{Y}-H_N\overline{\vartheta})d\overline{\vartheta} - h(N)M^2[\hat{f}(\overline{Y})]\right\},$$

где $H_N = \mathrm{diag}(h_1(N),...,h_n(N))$ – диагональная матрица.

На рисунке 3 приведена структурная схема, описывающая алгоритм вероятностного моделирования ПФ на параллельно связанных линиях в среде HFSS с 100 итерациями параметрического сканирования.

Шаг 1: Ввод исходных параметров фильтра.

Шаг 2: Анализ фильтра на параллельно связанных линиях в HFSS.

Цель данного шага – создание точной модели фильтра и проведение предварительной верификации его характеристик (*S*-параметры) перед параметрическим многовариантным анализом.

Шаг 3: Проверка соответствия ТЗ. После анализа проводится сравнение полученных характеристик с требованиями ТЗ. Если характеристики соответствуют ТЗ, переход к шагу 4. Если не соответствуют, выполняется доработка базовой модели (возврат к шагу 2).

Шаг 4: Задание диапазона изменения конструктивно-технологических параметров. Определяются переменные, имитирующие реальные технологические разбросы и допуски производства.

Шаг 5: Параметрическое моделирование с 100 вариациями конструктивных параметров. Проводится 100 независимых расчётов, в каждом из которых все выбранные параметры получают значения в заданных пределах.

Шаг 6: Извлечение выходных данных через Python API (PyAEDT).

Автоматизация извлечения данных (S_{21}, S_{11}, ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ и центральная частота) из 100 вариаций для последующего анализа с помощью PyAEDT.

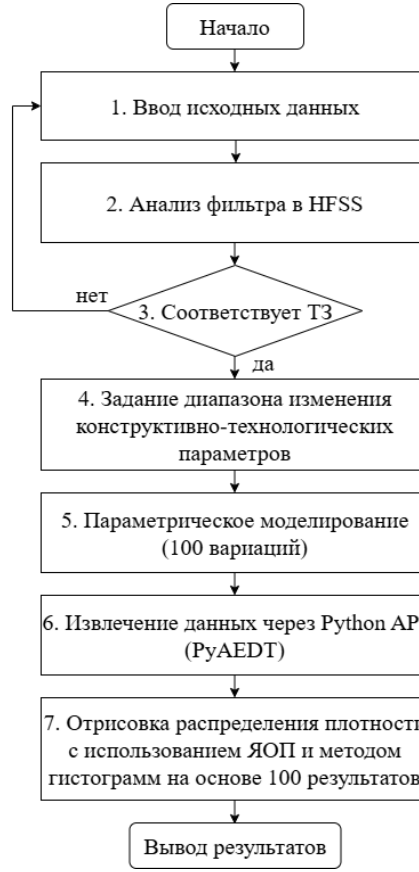


Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма вероятностного моделирования ПФ с использованием ядерных оценок плотности

Шаг 7: Отрисовка выходных данных по 100 результатам моделирования в среде HFSS с использованием метода ядерных оценок плотности и метода гистограмм.

В четвертой главе рассмотрено проектирование полосковых ПФ с использованием искусственных нейронных сетей, обеспечивающих высокую точность и снижение вычислительных затрат по сравнению с традиционными методами.

Разработана модель ИНС для прогнозирования S-параметров на основе размеров фильтра, частоты и характеристик подложки. База данных содержит результаты электродинамического моделирования N образцов фильтров для каждой совокупности входных параметров с целью обучения модели нейронной сети. Модели состоят из четырёх слоёв: входной слой содержит 4 нейрона (s_1, s_2, s_3 и частота f), два скрытых слоя с 30 нейронами в каждом слое и выходной слой (S_{21} и S_{11}) с 2 нейронами.

Архитектура модели нейронной сети для симуляции ПФ представлена на рисунке 4.

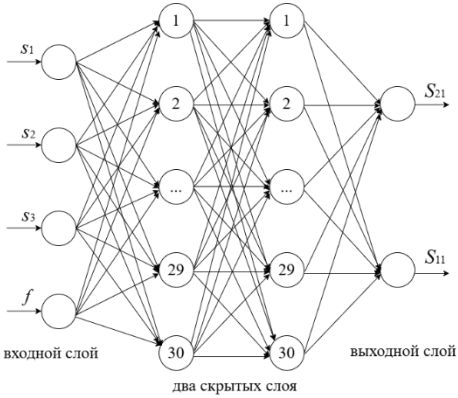


Рисунок 4 – Архитектура нейронной сети для проектирования ПФ

В качестве входных параметров для нейронной сети выбраны три диапазона допустимых геометрических размеров: зазор между линиями s_1 (0,05-0,2 мм), s_2 (0,1-0,3 мм) и s_3 (0,1-0,3 мм). В качестве выходных параметров используются частотно-зависимый коэффициент отражения S_{11} и коэффициент передачи S_{21}.

Нейросетевая модель обучена на данных, содержащих наборы (s_1, s_2, s_3, f, S_{21}, S_{11}). При прогнозировании значения зазоров s_1, s_2, s_3 фиксируются, а частота f последовательно перебирается в диапазоне 10-22 ГГц (50 точек) для построения полной частотной характеристики.

В нейросетевой модели был выбран алгоритм обучения Левенберга-Марквардта, который является высокоэффективным для поиска минимума функции ошибки.

Описаны вычисления матрицы Якоби и процесс обучения, подтверждена эффективность для сетей малого и среднего размера, но отмечены ограничения для больших сетей из-за вычислительных затрат. Процесс проектирования включает моделирование в HFSS, параметрическое сканирование через PyAEDT (библиотека Python, обеспечивающая автоматизацию и управление задачами моделирования в HFSS) и обучение ИНС, что минимизирует время симуляции при сохранении точности.

Алгоритм создания нейросетевой модели ПФ для прогнозирования характеристик S-параметров состоит из основной этапов (рисунок 5).

Этап 1. Выполняется синтез топологии ПФ на основе требований технического задания (центральная частота, полоса пропускания, и т. д.).

Этап 2. Формируются выходные конструктивные и электрофизические параметры синтезированной конструкции фильтра, включая геомет-

рические размеры элементов топологии и параметры подложки.

Этап 3. Проводится электродинамическое моделирование фильтра в средах HFSS и MWO для получения частотных зависимостей коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} в диапазоне 14–18 ГГц.

Этап 4. Оценивается соответствие полученных характеристик требованиям технического задания. При несоответствии осуществляется возврат к этапу синтеза (этап 1) для корректировки параметров конструкции. При соответствии процесс переходит к следующим этапам.

Этап 5. Выбирается архитектура ИНС с учетом размерности задачи: четыре входных геометрических параметра (s_1, s_2, s_3 и f) и выходные характеристики S_{11} и S_{21} в заданном частотном диапазоне.



Рисунок 5 – Схема алгоритма реализации нейросетевой модели ПФ

Этап 6. Выполняется параметрическое сканирование в HFSS с использованием автоматизированного интерфейса PyAEDT для генерации множества вариантов конструктивных параметров и проведения соответствующего многовариантного электродинамического моделирования.

Этап 7. Проводится нормализация полученных выходных данных (значений S_{21} и S_{11}) для улучшения сходимости обучения нейронной сети.

Этап 8. Формируются обучающая и тестовая выборки из нормализованного набора данных S_{21} и S_{11}.

Этап 9. Осуществляется обучение нейросетевой модели с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта.

Этап 10. Производится оценка точности обученной нейросетевой модели на тестовой выборке. Обученная нейросетевая модель проходит валидацию на независимой тестовой выборке, не участвовавшей в процессе обучения. Вычисляется ключевая статистическая метрика качества аппроксимации – средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error):

$$\mathrm{MAPE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|};$$

где y_i – истинное значение S-параметра из HFSS, $\hat{y}_i$ – предсказание нейронной сети, N – число образцов в валидационной выборке. Метрика MAPE показывает среднюю относительную ошибку в процентах и не зависит от масштаба данных.

Критериями приемлемости модели для инженерных расчётов принимаются MAPE < 3%. При несоответствии этим критериям осуществляется возврат к этапу 5 (выбор архитектуры ИНС) для корректировки структуры нейронной сети. При соответствии указанным критериям модель признаётся достаточно точной и переходит к финальному этапу 11.

Этап 11. Выполняется сравнение точности предсказаний нейросетевой модели с результатами независимых расчётов в HFSS, MWO и схемотехническим моделированием. При достижении приемлемого уровня согласования процесс завершается, нейросетевая модель признаётся адекватной и может использоваться в качестве быстрой замены трудоёмкого электродинамического моделирования при дальнейшем анализе и оптимизации ПФ.

В пятой главе приведены теоретические и экспериментальные исследования полосовых фильтров с улучшенными показателями качества.

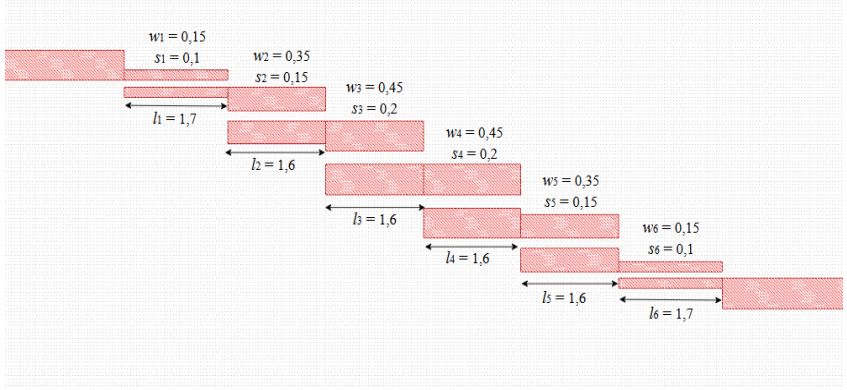


Рисунок 6 – Схема ПФ на параллельно связанных линиях

Представлена разработанная модель нейронной сети для проектирования ПФ с центральной частотой 16 ГГц и шириной полосы по уровню –3 дБ 5 ГГц. Данный фильтр приведен на рисунке 6.

На рисунках 7 и 8 приводятся коэффициенты передачи S_{21} и отражения S_{11}, полученные с помощью HFSS-симулятора и нейросетевой модели для ПФ со средней абсолютной процентной ошибкой 1%.

Модель ИНС, обученная на базе данных из N вариаций, прогнозирует S_{21} и S_{11} с точностью, близкой к результатам полученным с использованием HFSS-симулятора. Время проектирования сократилось с 8 минут (HFSS) до 30 секунд (ИНС).

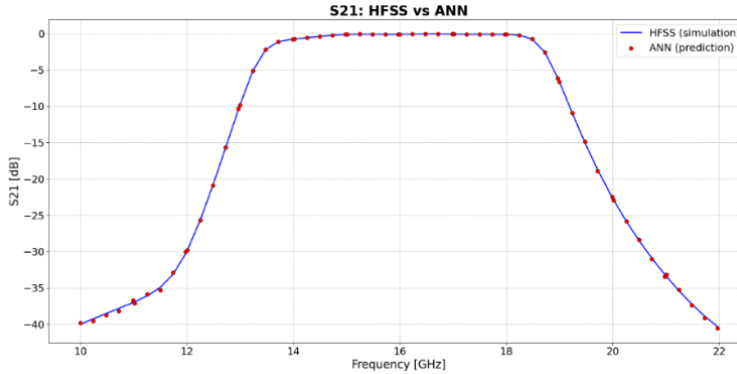


Рисунок 7 – Коэффициент передачи ПФ S_{21} полученный в среде HFSS и в ИНС

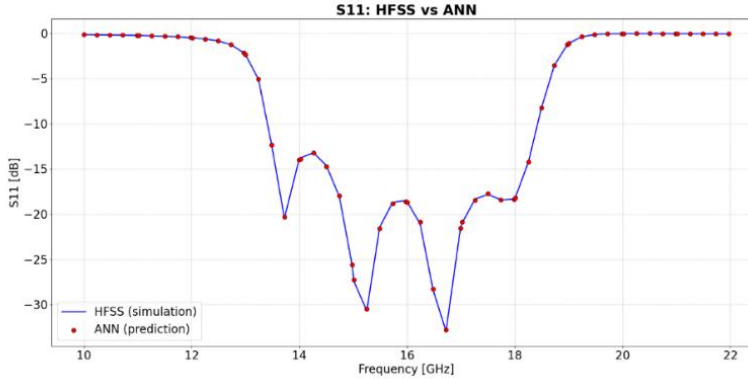


Рисунок 8 – Коэффициенты отражения ПФ S_{11} полученный в среде HFSS и ИНС

Для подтверждения масштабируемости алгоритма проведено моделирование двух дополнительных вариантов с использованием HFSS и ИНС.

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования для различных вариантов фильтра с использованием HFSS и ИНС

Вариант	Центральная частота (ГГц)	Ширина полосы по уровню –3 дБ (ГГц)	MAPE (%)	Время ИНС (с)	Время HFSS (мин)
Основной	16	5	1	30	8
Вариант 1	16	3,6	1	32	7,9
Вариант 2	12,5	4	1	28	7,8

Реализовано сравнение двух методов оценки плотности относительно истинной плотности стандартного нормального распределения. Значение интегрированной квадратичной ошибки (ИКО) для метода ЯОП составило 0,00102, что в 2,2 раза меньше, чем для гистограммы (ИКО = 0,00227). Это указывает на более высокую точность метода ЯОП при аппроксимации истинной плотности распределения.

Представлено вероятностное моделирование методом ядерных оценок полосового фильтра с центральной частотой 16 ГГц и шириной полосы по уровню –3 дБ 5 ГГц. Данный фильтр приведен на рисунке 6 (ε_r = 4,2; h = 1,58 мм). Конструктивно-технологический разброс параметров: Δw_i = ± 15 мкм, Δs_i = ± 15 мкм, Δl_i = ±15 мкм, $\Delta\ \varepsilon_{ri}$= ± 0,2, Δh_i = ± 50 мкм.

Ядерная оценка плотности коэффициента передачи, коэффициента отражения, ширины полосы пропускания по уровню –3 дБ и центральной частоты представлены на рисунках 9-12.

Метод ядерных оценок плотности формирует значительно более сгла-

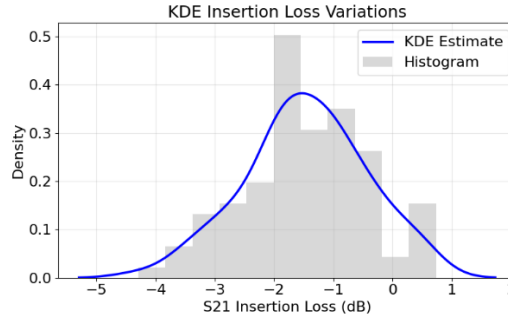


Рисунок 9 – Ядерная оценка плотности коэффициенты передачи ПФ

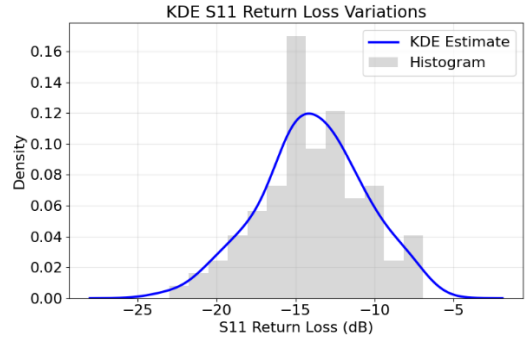


Рисунок 10 – Ядерная оценка плотности коэффициенты отражения ПФ

женные и плавные оценки по сравнению с методом гистограмм.

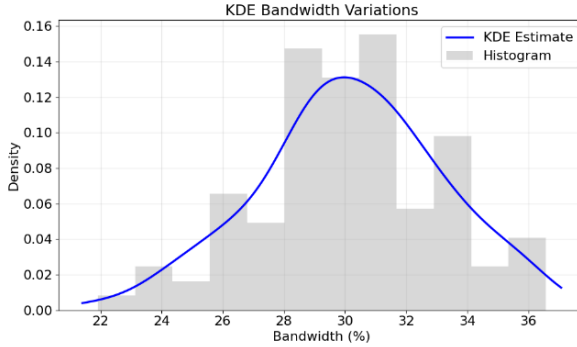


Рисунок 11 – Ядерная оценка плотности ширины полосы пропускания ПФ по уровню –3 дБ

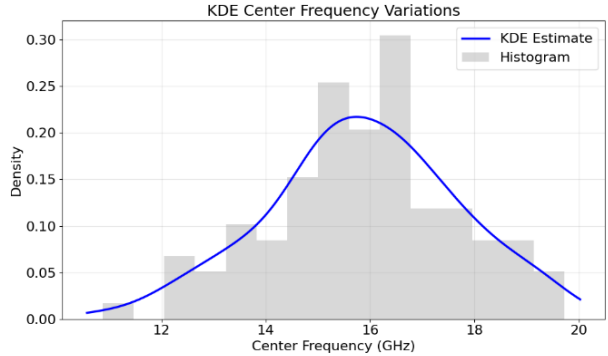


Рисунок 12 – Ядерная оценка плотности центральной частоты ПФ

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Проведён анализ современного состояния методов и алгоритмов проектирования полосковых фильтров, их роли в составе приемопередающих модулей, а также рассмотрена классификация фильтров по электрическим и конструктивным признакам. Показано, что традиционные подходы электродинамического моделирования фильтров обладают высокой ресурсоёмкостью и не учитывают технологические погрешности. Поэтому в работе решаются актуальные задачи повышения быстродействия и точности реализации проектных задач для полосковых фильтров на основе искусственных нейронных сетей и вероятностных подходов.

2. Разработана математическая модель (схемотехнический метод) радиотехнических фильтров на основе СЛ, одновременно учитывающая потери в проводниках и диэлектрике, дисперсию, многослойность и шерохо-

ватость проводящей поверхности. Модель позволила повысить точность проектирования: максимальное расхождение расчётных и экспериментальных данных не превышает ±0,3 дБ.

3. Предложен алгоритм вероятностного моделирования полосовых фильтров на основе метода ядерных оценок плотности распределения выходных параметров. Алгоритм обеспечивает гладкую оценку плотности вероятности и позволяет с высокой точностью определять основные статистические характеристики. Сравнение с истинной плотностью стандартного нормального распределения показало снижение интегрированной квадратичной ошибки в 2,2 раза по сравнению с методом гистограмм.

4. Предложен подход к моделированию фильтров радиотехнических систем с использованием искусственных нейронных сетей. Разработана нейросетевая модель для симуляции 5-резонаторного полосового фильтра на СЛ с центральной частотой 16 ГГц и шириной полосы пропускания по уровню –3 дБ 5 ГГц. Эксперимент показал среднюю абсолютную процентную ошибку 1%. Ключевым преимуществом нейросетевой модели является сокращение времени симуляции в 16 раз. Масштабируемость алгоритма подтверждена на трех вариантах 5-резонаторного полосового фильтра.

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

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

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

2. Лыу Т. Д. Моделирование фильтров на связанных линиях / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С. 3-12.

3. Лыу Т. Д. Алгоритм выбора ширины полосы пропускания в методе ядерной оценки плотности / Т. Д. Лыу // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 93. – С. 41-50.

4. Лыу Т. Д. Алгоритм нейросетевого моделирования фильтров на связанных полосковых линиях / Т. Д. Лыу, Е. П. Васильев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2026. – № 95. – С. 41-52.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

5. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа статистического моделирования селективных устройств // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024661158, Зарегистрировано в

РОСПАТЕНТ 16.05.2024, заявка № 2024619496 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

6. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа выбора ширины полосы пропускания в методе ядерной оценки плотности // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025685054, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 19.09.2025, заявка № 2025683139 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

7. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа расчета микрополосковых линий для фильтров радиотехнических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2026614583, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 17.02.2026, заявка № 2026613727 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

8. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа расчета связанных микрополосковых линий для фильтров радиотехнических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2026614688, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 17.02.2026, заявка № 2026613804 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

9. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа расчета симметричных связанных полосковых линий для фильтров радиотехнических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2026614582, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 17.02.2026, заявка № 2026613726 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

10. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа расчета симметричных полосковых линий для фильтров радиотехнических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2026614960, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 19.02.2026, заявка № 2026613991 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

11. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа расчета щелевой линии и компланарного волновода для фильтров радиотехнических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2026618210, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 24.03.2026, заявка № 2026617621 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

12. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Программа проектирования фильтров на связанных линиях с использованием искусственных нейронных сетей // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2026618181, Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 24.03.2026, заявка № 2026617616 / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

Учебно-методическая работа

13. Васильев Е. П., Лыу Т. Д. Моделирование селективных устройств: методические указания к практическим и лабораторным занятиям / Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2024. – 32 с.

Статьи в сборниках научных трудов и тезисы докладов конференций

14. Лыу Т. Д. Анализ конструктивных типов фильтров на связанных линиях / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: сборник трудов V Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 2022. – Т. 6. – С. 44-48.

15. Лыу Т. Д. Автоматизация проектирования селективных устройств систем космической связи / Т. Д. Лыу // XXVII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» Рязань: РГРТУ, 2022. – Т. 1. – С. 262-263.

16. Лыу Т. Д. Синтез эллиптических полосовых фильтров систем связи / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023: сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 2023. – Т. 6. – С. 50-53.

17. Лыу Т. Д. Вероятностное моделирование селективных устройств / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // XXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» Рязань: РГРТУ, 2023. – Т. 2. – С. 217-219.

18. Лыу Т. Д. Вероятностное моделирование селективных устройств методом Монте-Карло / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» Рязань: РГРТУ, 2023. – С. 377-382.

19. Лыу Т. Д. Микроволновые сумматоры-делители мощности / Е. П. Васильев, Д. Х. Нгуен, Т. Д. Лыу // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» Рязань: РГРТУ, 2023. – С. 418-424.

20. Лыу Т. Д. Вероятностное моделирование селективных устройств методом ядерных оценок / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 2024. – Т. 6. – С. 45-50.

21. Лыу Т. Д. Алгоритм моделирования селективных устройств методом ядерных оценок / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 2024. – Т. 6. – С.50-55.

22. Лыу Т. Д. Вероятностное моделирование селективных устройств систем космической связи / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // XXIX Всероссийская

научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» Рязань: РГРТУ, 2024. – Т. 2. – С. 200-201.

23. Лыу Т. Д. Статистическое моделирование микроволновых фильтров на связанных линиях / Е. П. Васильев, Т. Д. Лыу // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 2025. – Т. 6. – С. 141-145.

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

Лыу Тхань Дат

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. _____. 2026. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ _____
Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.