

На правах рукописи



Гордеева Виктория Олеговна

**Полосковые и кабельные
оптимизированные помехозащитные структуры
на основе модального разложения помеховых сигналов**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель – **Белоусов Антон Олегович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления ТУСУР

Официальные оппоненты – **Увайсов Сайгид Увайсович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»;

Дмитренко Анатолий Григорьевич,
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Защита состоится «25» ноября 2025 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/2fcbugl4>

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие радиоэлектронных средств (РЭС) всё сильнее актуализирует обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС). Как известно, электромагнитные воздействия (ЭМВ) могут дестабилизировать и разрушать РЭС. Отдельного внимания заслуживают кондуктивные помехи, обладающие субнаносекундным временем нарастания или спада и высоким напряжением, называемые сверхкороткими импульсами (СКИ). Так, СКИ способны нанести существенный вред критичным техническим средствам, нарушив режим их работы или даже выведя их из строя, проникнув в критичные узлы. Для защиты РЭС от СКИ предложена модальная фильтрация, использующая разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды из-за различия задержек мод в многопроводной линии передачи. Устройства, работающие на этой основе, называют модальными фильтрами (МФ). Их часто реализуют полосковыми на печатных платах (ПП), но возможны и кабельные МФ. На этапе проектирования МФ важен выбор оптимальных значений геометрических и электрофизических параметров. Для этого применяют эволюционные алгоритмы и эвристический поиск (ЭП) при оптимизации по ряду критериев, учитывающих амплитудные и временные характеристики выходного напряжения, согласование с трактом, массогабаритные и стоимостные характеристики МФ.

Степень разработанности темы. Актуальность обеспечения и изучения ЭМС подтверждается рядом работ под авторством М.Л. Волина, В.И. Ефанова, Д. Уайта и др. Большое внимание уделялось преднамеренным электромагнитным помехам в работах Р.В. Киричка, С.И. Комягина, Ю. Сахарова, N. Mora. Исследования по оценке устойчивости РЭС к воздействию электромагнитных полей, созданию генераторов импульсов и разработке средств и методов для оценки влияния ЭМВ показаны в работах В.П. Беличенко, А.М. Белянцева, В.И. Кошелева, Л.О. Мыровой, Ю.В. Парфенова. Устройства защиты от ЭМП на основе модальной фильтрации исследовали Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и И.Е. Самотин. Эволюционные алгоритмы широко используются в области оптимизации и искусственного интеллекта. Они стали популярны в 50–70-х годах и представлены в работах N. Barricelli, J.L. Crosby, D.B. Fogel, A. Fraser, J.H. Holland. Большой вклад в разработку, исследование и применение эволюционных алгоритмов на практике внесли Л.А. Гладков, А.В. Еремеев, В.В. Курейчик, И.П. Норенков, В. Freisleben. Н.Р. Schwefel и I. Rechenberg разработали алгоритм эволюционных стратегий (ЭС), который стал одним из самых распространенных. Для задач оптимизации отлично подходит ЭС преобразования ковариационной матрицы (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES), с которой работали А.О. Мелкозеров, N. Hansen, A. Ostermeier, Z. Bayraktar, M.D. Gregory, D.H. Werner и др. Разработка критериев и применение эволюционных алгоритмов при оптимизации защитных структур с модальным разложением рассматривались в работах А.О. Белоусова и Т.Т. Газизова. Между тем расширение инструментария оптимизации, за счет стохастических и детерминированных подходов, а также иных критериев, ранее не рассматривалось. Так, существующие критерии не учитывают частотные характеристики МФ, целостность передаваемого сигнала, а также помехи одновременно с двух направлений.

Цель работы – улучшить характеристики полосковых и кабельных помехозащитных структур с модальным разложением за счёт использования алгоритмов глобальной оптимизации.

Для ее достижения надо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор существующих структур с модальным разложением, критериев и алгоритмов их оптимизации.
2. Выполнить многовариантный анализ и оптимизацию полосковых и кабельных МФ эвристическим поиском.
3. Разработать подход к параметрической оптимизации МФ на основе круглых кабелей.
4. Сформулировать новые критерии оптимизации, учитывающие временные и частотные характеристики, и апробировать их на полосковых МФ.
5. Разработать и апробировать алгоритм оптимизации, находящий глобальный экстремум целевой функции с высокой точностью за умеренное время.
6. Сравнить алгоритмы случайного поиска, ветвей и границ, имитации отжига, симплицальной гомологии при оптимизации модальных фильтров на основе полосковых и кабельных структур.
7. Дать рекомендации по глобальной оптимизации полосковых и кабельных МФ.
8. Разработать макеты кабельных МФ и выполнить их измерения.

Объектом исследования являются полосковые и кабельные МФ. **Предметом** является улучшение их временных и частотных характеристик за счет использования новых критериев и глобальных алгоритмов оптимизации.

Научная новизна

1. Введены критерии оптимизации модальных фильтров, отличающиеся учетом их частотных характеристик (максимизация и контроль частоты среза), целостности полезного сигнала, а также помех одновременно с двух направлений.
2. Доказана эффективность применения различных классов глобальных алгоритмов при оптимизации полосковых и кабельных модальных фильтров.
3. Разработаны модальные фильтры на основе круглой и плоской кабельных структур, отличающиеся использованием компаунда на основе радиопоглощающего материала в качестве диэлектрического заполнения.

Теоретическая значимость

1. Изучены причинно-следственные связи при оптимизации полосковых и кабельных структур с модальным разложением глобальными алгоритмами.
2. Изучены особенности влияния параметров модальных фильтров на основе круглых и плоских кабельных структур на их временные и частотные характеристики.
3. Раскрыто влияние экрана и асимметрии поперечного сечения на временные характеристики модальных фильтров на основе круглых и плоских кабельных структур.

Практическая значимость

1. Разработаны и внедрены результаты: моделирования и оптимизации по

ряду критериев полосковых и кабельных модальных фильтров для защиты радиоэлектронных средств (три акта внедрения в НИР по грантам РФФИ и госзадания, один в СЧ ОКР); использования широкого ряда глобальных алгоритмов при оптимизации модальных фильтров (акт внедрения в учебный процесс ТУСУРа).

2. Представлен подход к оптимизации модальных фильтров на основе круглых кабелей для корректной параметрической оптимизации.

3. Модернизирован алгоритм эволюционных стратегий для возможности задания диапазонов оптимизируемых параметров.

4. Представлены результаты оптимизации модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии по одному и двум критериям в условиях экстремальных температур и влияния влаги.

5. Создан гибридный алгоритм адаптивного усечения секций с равномерным разбиением исходной области на секции, внутри которых случайным образом формируется набор решений.

6. Определены перспективы практического использования генетического алгоритма, эволюционных стратегий, случайного поиска, имитации отжига, ветвей и границ и симплицальной гомологии при оптимизации структур с модальным разложением.

7. Создана система практических рекомендаций по выбору и использованию глобальных алгоритмов при оптимизации модальных фильтров.

Положения, выносимые на защиту

1. Совокупность разработанных критериев позволяет комплексно оптимизировать модальные фильтры с учётом помеховых и полезных сигналов, обеспечивая выполнение требований к частоте среза, глазковой диаграмме и уровню помех одновременно с двух направлений.

2. При оптимизации полосковых и кабельных модальных фильтров по одному и двум критериям детерминированные, стохастические, вероятностный и гибридный алгоритмы дают результаты, близкие к результатам эволюционных алгоритмов.

3. Разработанный модальный фильтр на основе круглой кабельной структуры с полосой пропускания 580 МГц ослабляет помеху общей длительностью 80,5 пс по уровню 0,5 в 6,17 раза, а на основе плоской кабельной структуры с полосой пропускания 83,3 МГц – 200 пс по уровню 0,5 в 7 раз.

Результаты соответствуют п. 6 и 7 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Методология и методы исследования. Применены математическое моделирование на основе метода моментов и модифицированного узлового метода, конечных разностей во временной области, модальный анализ, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и алгоритмами глобальной оптимизации. Измерения в частотной области выполнялись векторным анализатором цепей.

Достоверность результатов основана на корректном использовании теории линий передачи и численных методов, сопоставимости результатов квазистатического и электродинамического подходов и их согласованности с результатами измерений на сертифицированных и поверенных аппаратно-программных комплексах.

Использование результатов исследований

1. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках государственного задания FEWM-2020-0041, 2020–2023 гг.

2. НИР «Комплексное исследование кабельных и полосковых структур с модальными явлениями для защиты критического оборудования от сверхкоротких импульсов», грант Президента Российской Федерации МК-900.2022.4, 2022–2023 гг.

3. НИР «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях» (номер темы FEWM-2022-0001) в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, 2022–2023 гг.

4. НИР «Методология обеспечения электромагнитной совместимости средств функционального поражения электромагнитным излучением с другими радиоэлектронными средствами в составе комплекса противодействия беспилотным летательным аппаратам», грант РФФИ 22-29-01331 от 29.12.2021 г., 2021–2022 гг.

5. НИР «Теоретическое обоснование появления комбинационных импульсов в многопроводных линиях передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением», грант РФФИ 22-79-00187 от 27.07.2022 г., 2022–2023 гг.

6. НИР «Интеллектуальная оптимизация пассивных полосковых и кабельных структур для защиты радиоэлектронных средств от сверхширокополосных помех с использованием машинного обучения», грант РФФИ №24-29-00578 от 29.12.2023 г., 2024–2025 гг.

7. НИР «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования FEWM-2024-0005, 2024–2026 гг.

8. СЧ ОКР «Разработка среды проектирования и программных модулей базовой версии полного маршрута автоматизированного проектирования СВЧ АЗВ5 МИС и ГИС» (шифр «САПР СВЧ ИС – Б»), договор № 998/531-Д/СК-ТУ-СУР, 2025–2026 гг.

9. Учебный процесс РФФИ ТУСУРа.

10. Результаты интеллектуальной деятельности: 2 патента на изобретение и 11 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: гранта Президента РФ; РФФИ; государственного задания; стипендии Президента ТУСУР в 2025 г. и К.А. Валиева в 2023 и 2024 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах конференций: Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2021 г.; Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials

(EDM), Республика Алтай, 2022, 2023 гг.; Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), г. Томск, 2022 г.; Int. Conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), г. Новосибирск, 2024 г.

Публикации. Результаты отражены в 30 публикациях (3 без соавторов): 6 в журналах из перечня ВАК; 1 в журнале, индексируемом в WoS и Scopus (Q2); 3 в журналах, индексируемых в WoS и Scopus; 5 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 1 доклад в трудах отечественных конференций; 1 монография; 11 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и 2 патента на изобретение.

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или совместно с научным руководителем. Личный вклад автора состоит в выполнении моделирования и оптимизации, формулировке ряда критериев, создании алгоритма оптимизации, обработке и интерпретации входных данных и подготовке публикаций. Часть результатов (подраздел 3.3 диссертации) получена с Кимом Г.Ю. Разработка макетов модальных фильтров и измерения выполнены с Жечевым Е.С.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы из 141 наименований, 3 приложения. Объем диссертации – 212 с., в т.ч. 106 рисунков и 67 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Защита радиоэлектронных средств от сверхкоротких импульсов: обзор

В подразделе 1.1 показана актуальность защиты РЭС от СКИ. В подразделе 1.2 представлены методы защиты от ЭМВ, включающие как традиционные подходы, так и основанные на модальном разложении. В подразделе 1.3 описаны особенности моделирования структур с модальным разложением. В подразделе 1.4 приведены критерии и алгоритмы оптимизации структур с модальным разложением. В подразделе 1.5 сформулированы цель и задачи работы.

2. Моделирование и оптимизация структур с модальным разложением

В подразделе 2.1 представлены результаты предварительного моделирования полосковых МФ: на основе 3-проводной микрополосковой линии (МФ 1) и 2-проводной полосковой линии с лицевой связью (МФ 2). Их поперечные сечения в общем виде и эквивалентные схемы показаны на рисунках 2.1–2.2. Выполнена оптимизация по амплитудному критерию посредством ЭП. Выявлено, что при оптимизации МФ 1 и 2 по амплитудному критерию наибольшее влияние оказывают параметры: толщина диэлектрического слоя (h), толщина проводников (t), расстояние между проводниками (s_i).

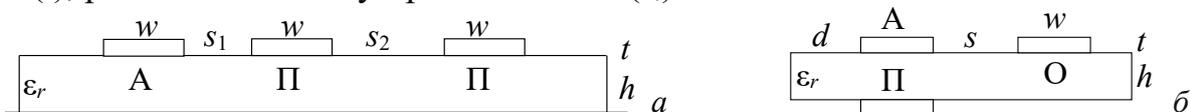


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения МФ 1 (а) и МФ 2 (б)

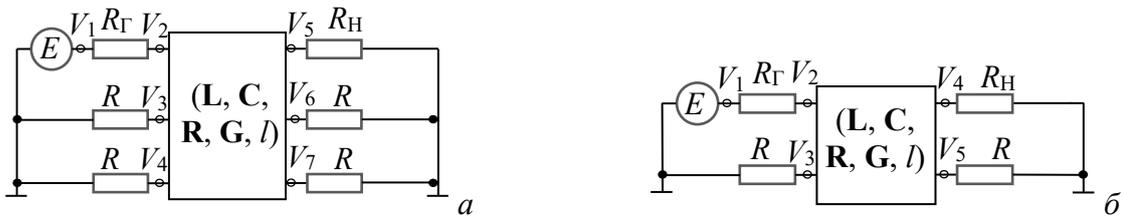


Рисунок 2.2 – Эквивалентные схемы МФ 1 (а) и МФ 2 (б)

В подразделе 2.2 представлены результаты предварительного моделирования круглых и плоских кабельных МФ. Поперечные сечения в общем виде представлены на рисунках 2.3–2.4. Выполнена оптимизация по амплитудному критерию посредством ЭП. Выявлены параметры, рекомендованные для оптимизации по амплитудному критерию: радиусы проводников (r_{1i}), толщина изоляции вокруг проводников (h_{1i}), ($i=2, 3, \dots, N$) для круглых и r_{1i} , h_{1i} , s_i , толщина внешнего диэлектрического слоя (h_3) для плоских кабельных МФ.

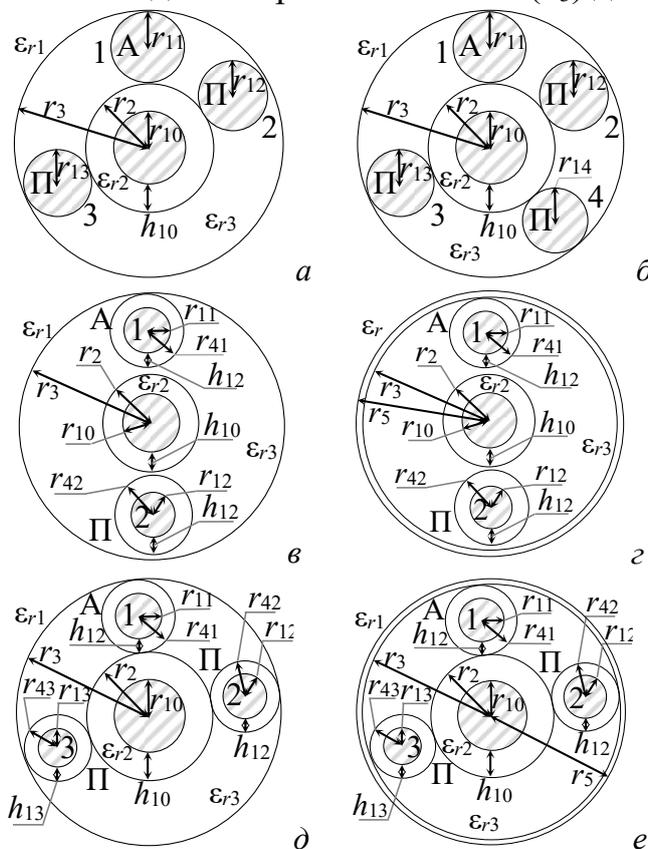


Рисунок 2.3 – Поперечные сечения МФ 3 (а), 4 (б), 5 (в), 6 (г), 7 (д) и 8 (е)

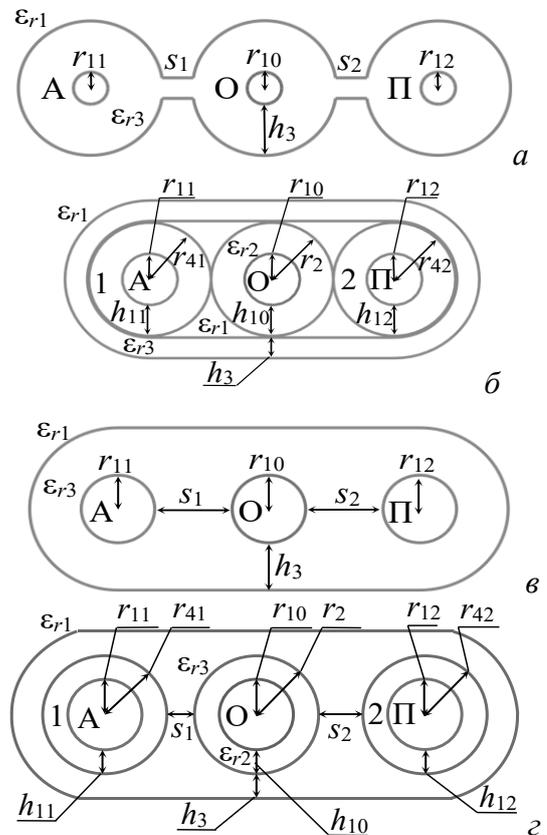


Рисунок 2.4 – Поперечные сечения МФ 9 (а), 10 (б), 11 (в) и 12 (г)

В подразделе 2.3 детализированы различия в оптимизации полосковых и круглых кабельных МФ. Предложен подход к оптимизации круглых кабельных МФ, основанный на использовании полярной системы координат при построении геометрических моделей, позволяющий избежать наложения проводников.

3. Оптимизация структур с модальным разложением глобальными алгоритмами

В подразделе 3.1 сформулированы критерии оптимизации и их нормировочные коэффициенты. Они учитывают частотные характеристики МФ, двусто-

роннее воздействие помехового сигнала, а также целостность передаваемого сигнала. Итоговый вид этих критериев и соответствующих им нормировочных коэффициентов

$$f_1 = \frac{1}{f_{\text{cp}}}, K_1 = f_{\text{max}}, \quad (3.1)$$

$$f_2 = |f_x - f_{\text{cp}}|, K_2 = f_{\text{max}}, \quad (3.2)$$

$$f_3 = \max(U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)), K_3 = \max|E(t)|, \quad (3.3)$$

$$f_4 = -(U_{P90} - U_{P10}), K_4 = \max|E(t)|, \quad (3.4)$$

где f_{cp} – частота среза, f_{max} – максимальная частота в диапазоне моделирования (задаваемая пользователем), f_x – заданное значение f_{cp} , U_{P90} и U_{P10} – 90-й и 10-й процентиля уровня напряжения, $E(t)$ – амплитуда ЭДС источника.

В подразделе 3.2 предложен модифицированный алгоритм ЭС (далее – ЭС), позволяющая задавать диапазоны оптимизируемых параметров. Разработан гибридный алгоритм адаптивного усечения секций (АУС), совмещающий детерминированный и стохастический подходы. Он делит пространство поиска на $K=N^d_{\text{sec}}$ секций (где N_{sec} – число секций на переменную, d – число оптимизируемых переменных) и отсекает половину «неперспективных» секций на основе полученных оценок целевой функции (ЦФ). Апробация алгоритма АУС выполнена на двух разных функциях: сферы и Экли. Даны рекомендации по его настройке.

В подразделе 3.3 представлены результаты оптимизации полосковых МФ по критериям из подразделов 1.4 и 3.1 с использованием генетического алгоритма (ГА), ЭС, случайного поиска (СП), имитации отжига (ИО), ветвей и границ (ВГ) и симплицальной гомологии (SHGO). При оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию диапазоны оптимизируемых параметров взяты: 200–1000 мкм для h , 18–200 мкм для t , 10–300 мкм для s_1 и s_2 . Для ЭС шаг $\sigma=10$ мкм, а начальные решения: $h=500$ мкм, $t=30$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=200$ мкм. Ширина проводников взята $w=1000$ мкм, $d=3w$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r=4,5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,025$. Длина $l=0,6$ м, сопротивления на концах проводников $R_{\Gamma}=R_{\text{H}}=R=50$ Ом. Параметры СКИ: $E=1$ В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 50 пс, общая длительность импульса (t_{Σ}) – 150 пс. На рисунке 3.1 показаны формы выходного напряжения.

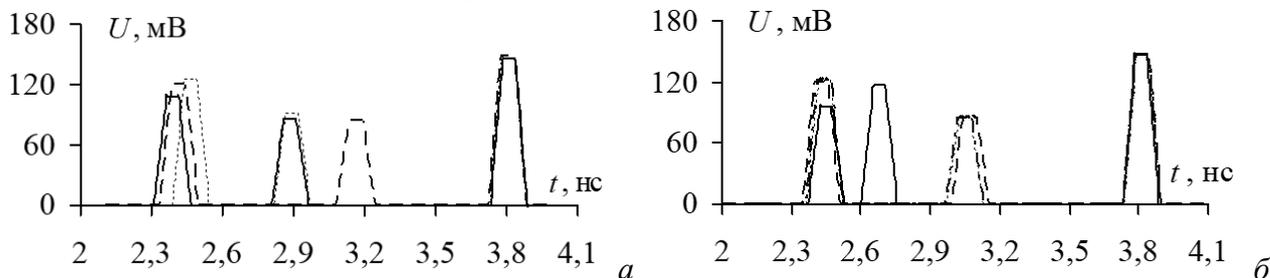


Рисунок 3.1 – Формы выходного напряжения для наилучшего результата оптимизации МФ 1 посредством ГА (—), ЭС (···), СП (---) (а), и SHGO (···), ВГ (— · —), ИО (—) и АУС (---) (б)

Амплитуды и погонная задержка (τ) импульса 3 отличаются менее 1%. Минимум максимального напряжения на выходе МФ (U_{max}) после оптимизации алгоритмом SHGO получен при числе вершин в симплексе $D=1000$ и составляет 146,2 мВ, что совпадает с результатом ГА (146,2 мВ) при числе вычислений

$N_{it}=50/100$, и меньше, чем у ЭС (147,4 мВ при $N_{it}=1000$) на 0,41%, СП (149,1 мВ при $N_{it}=1000$) на 0,98%, ВГ (146,3 мВ при разбиении на 5 секций) на 0,03%, ИО (147,9 мВ, при $N_{it}=500$) на 0,58% и АУС (146,9 мВ, при $N_{it}=4980$) на 0,24%.

МФ 2 оптимизирован по одному (амплитудный) и двум (амплитудный и согласования) критериям посредством ГА, ЭС и СП. Диапазоны оптимизируемых параметров: 100–1000 мкм для h , 30–175 мкм для t , 200–2000 мкм для s . Начальные решения для ЭС: 500 мкм для h , 100 мкм для t , 1 мм для s . Остальные параметры: $w=2000$ мкм, $d=w$, $\varepsilon_r=4,5$ и $\text{tg}\delta=0,025$. Параметры СКИ, l , R такие же, как для МФ 1. Формы выходного напряжения приведены на рисунках 3.2–3.3. При оптимизации по одному критерию посредством СП получен минимум $U_{\max}=86,9$ мВ (при $N_{it}=2500$), ЭС – 86,3 мВ (при $N_{it}=5000$), ГА – 86,2 мВ (при $N_{it}=50/100$). При оптимизации по двум критериям наилучшие результаты получены при $N_{it}=500$ для ЭС (напряжение на входе МФ $U_{\text{вх}}=612,8$ мВ, $U_{\max}=97,5$ мВ), при $N_{it}=100$ для ГА ($U_{\text{вх}}=601,5$ мВ, $U_{\max}=92,9$ мВ), при $N_{it}=2500$ для СП ($U_{\text{вх}}=577,1$ мВ, $U_{\max}=91,9$ мВ).

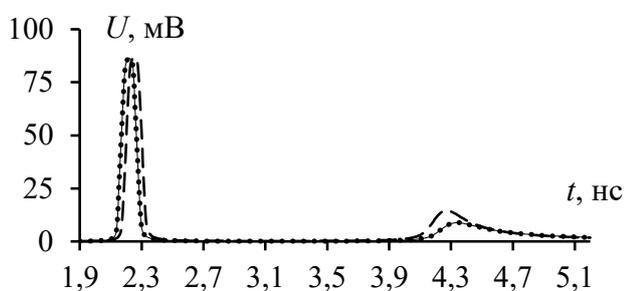


Рисунок 3.2 – Формы выходных напряжений после оптимизации МФ 2 ГА (—), ЭС (···) и СП (---) по одному критерию

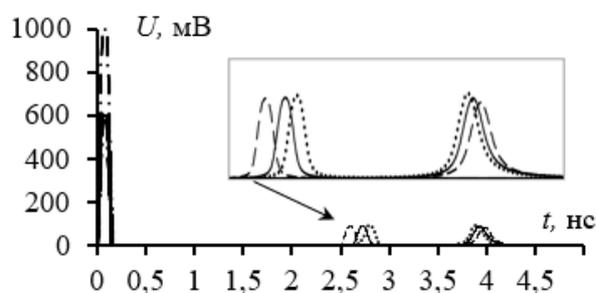


Рисунок 3.3 – Формы ЭДС (---), напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ 2 после ГА (—), ЭС (···) и СП (---) по двум критериям

Представлены результаты оптимизации МФ 1 по (3.1) и (3.2) посредством ГА, ЭС и СП. Параметры МФ остались неизменными. Воздействовал источник гармонической ЭДС 2 В. Максимум f_{cp} для ЭС получен при $N_{it}=5000$ и составляет 518,2 МГц, для ГА при $N_{it}=5000$ – 517 МГц, а для СП при $N_{it}=2500$ – 505,8 МГц. При оптимизации по (3.2) достигнуто целевое значение 425 МГц.

Оптимизация МФ 1 посредством ГА по (3.3) выполнялась для двух случаев: с одинаковым и разным воздействием с двух генераторов. Эквивалентная схема и пример деления проводника на 50 секций показаны на рисунке 3.4. Оптимизация s_1 и s_2 выполнялась в диапазоне 75–500 мкм, а для t и h взяты значения изготовителей ПП: 18, 35, 50, 70, 105 и 200 мкм для t и 100, 150, 200, 250, 360, 510, 710, 1000, 1500 мкм для h . Параметры w , d , ε_r , $\text{tg}\delta$ остались неизменными, как и параметры СКИ, l и R_{Γ} , R_H , R . Для второго – параметры соответствуют сигналам с генераторов IRA II (E_1) (рисунок 3.5) и SINUS-160 (E_2) (рисунок 3.6), а их амплитуда понижена в 10^4 раз (для упрощения анализа) и составила 5647 мВ и 2575 мВ, соответственно. R_{Γ} и R между узлами V_3/V_4 и землей взяты по 50 Ом, а R_H и R между узлами V_6/V_7 и землей – по 30 Ом.

Формы напряжений в подсекциях 25 (для первого случая) и 24 и 22 (для второго) показаны на рисунках 3.7–3.8. При одинаковых воздействиях сигналы накладываются друг на друга, начиная с подсекций 22–28, а максимум $U_{\max}=159,8$ мВ получен при $N_{it}=10/100$ в подсекции 25 (до оптимизации

$U_{\max}=451,7$ мВ, т.е. в 2,8 раза больше). Для второго случая $U_{\max}=717$ мВ получен при $N_{it}=10/100$ в подсекции 22 (до оптимизации 2102 мВ в подсекции 24, т.е. в 2,9 раз больше).

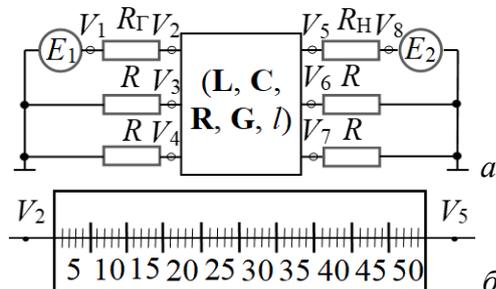


Рисунок 3.4 – Эквивалентная схема МФ 1 для оптимизации по (3.3) (а) и деление проводника на 50 подсекций (б)

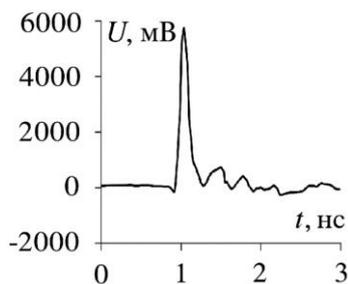


Рисунок 3.5 – Форма ЭДС с IRA II

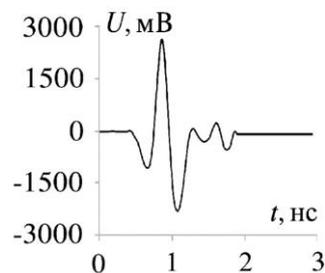


Рисунок 3.6 – Форма ЭДС с SINUS-160

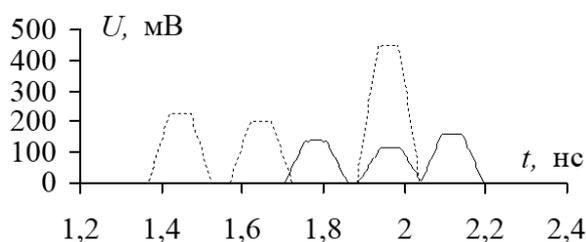


Рисунок 3.7 – Формы напряжений в подсекции 25 до (.....) и после (—) оптимизации

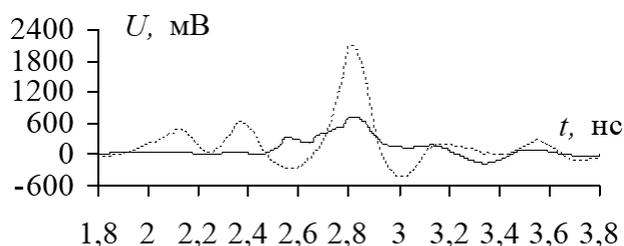


Рисунок 3.8 – Формы напряжения в подсекции 24 до (····) и 22 после (—) оптимизации

При оптимизации МФ 1–2 посредством ЭС по (3.4) параметры и их диапазоны такие же как ранее, а $l=1$ м. Воздействие – псевдослучайная битовая последовательность во временной области длительностью 50 мкс с временным шагом 10 пс. Для увеличения раскрытия глаза необходимо максимизировать разность процентилей (значений, ниже которых находится заданный процент данных) напряжения $\Delta U_P = U_{P90} - U_{P10}$. Для МФ 1 до оптимизации она составила $\Delta U_P = 469,6$ мВ, а после – $\Delta U_P = 496,7$ мВ, увеличивая раскрытие на 2,8%. Для МФ 2 раскрытие увеличилось на 34% (с $\Delta U_P = 125,8$ мВ до $\Delta U_P = 255,4$ мВ). Для обоих МФ решения получены при $N_{it} = 500$.

В подразделе 3.4 представлены результаты оптимизации кабельных МФ по одному и двум критериям посредством ГА, ЭС и СП. МФ 3 оптимизировался посредством ЭС по одному и двум критериям при фиксированных $r_{10} = r_{11} = 0,9$ мм и угле расположения активного проводника $\alpha_A = 95^\circ$, а для пассивных проводников эти углы определялись условием

$$\varphi = \alpha_A \pm (\alpha + 3), \quad (3.5)$$

где $\alpha = 180(\sum r_{Pi})/\pi R_{ПА}$ ($R_{ПА}$ – расстояние от начала координат до центра i -х проводников, для упрощения принятое одинаковым; r_{Pi} – радиусы соседних проводников, между которыми определяется угол).

При этом радиус изоляции опорного проводника $r_2 = r_{10} + h_{10}$, а радиус внешней изоляции МФ $r_3 = r_2 + 2r_{11} + 0,05$ мм. Оптимизировались: r_{12} и r_{13} в диапазоне 0,5–0,9 мм; h_{10} – 0,1–0,7 мм; радиусы от центра сигнальных проводников до начала координат ($R_{П1}$ и $R_{П2}$) от $(r_2 + r_{12}/r_{13} + 25$ мкм) до $(r_3 - r_{12}/r_{13} - 25$ мкм); угол расположения проводника относительно начала координат φ_1 от 10° до границы, определяемой (3.5), φ_2 от границы, определяемой (3.5), до 350° . Начальные

решения для ЭС: $r_{12}=r_{13}=0,7$ мм, $h_{10}=0,5$ мм, $R_{П1}=R_{П2}=2,45$ мм, $\varphi_1=45^\circ$, $\varphi_2=260^\circ$, а шаг – $\sigma=0,1$ мм. Значения l и R такие же, как у МФ 1. Воздействовал СКИ с ЭДС 5 В и $t_\Sigma=150$ пс. После оптимизации по одному критерию при $N_{it}=5000$ получено $U_{max}=0,61$ В, что в 1,56 раза меньше результатов ЭП (рисунок 3.9), а при оптимизации по двум – при $N_{it}=2500$ ($U_{вх}=1,998$ В, $U_{max}=0,878$ В) (рисунок 3.10).

Показаны результаты оптимизации МФ 4 и 7 по амплитудному критерию посредством ЭС и подхода из подраздела 2.3. Для МФ 4 после оптимизации ЭС $U_{max}=0,53$ В (при $N_{it}=500$), а ЭП – 1 В. Для МФ 7 после оптимизации ЭС $U_{max}=0,78$ В (при $N_{it}=5000$), а ЭП – 0,83 В.

При оптимизации МФ 12 по двум критериям фиксированы $r_{10}=1,3$ мм и $h_{10}=0,8$ мм, а радиусы изоляции вокруг сигнальных проводников (r_{4i}) определяются как $r_{41}=r_{11}+h_{11}$ и $r_{42}=r_{12}+h_{12}$ (где $h_{11}=h_{12}=0,8$ мм). Оптимизировались r_{11} , r_{12} , s_1 , s_2 и h_3 в диапазонах параметров одножильных проводов Н07V-U: 0,5–1,8 мм для r_{11} , r_{12} , s_1 и s_2 и 0,1–1 мм для h_3 . Начальные решения для ЭС: 1,1 мм для r_{11} , r_{12} и s_1 и s_2 , 0,5 мм для h_3 (с шагом $\sigma=0,1$ мм). Параметры воздействующего СКИ, l и R такие же, как при оптимизации МФ 3 по двум критериям. Наилучшие результаты получены при $N_{it}=500$ для ЭС ($U_{вх}=721$ мВ, $U_{max}=73,1$ мВ), при $N_{it}=50$ для ГА ($U_{вх}=715,6$ мВ, $U_{max}=77$ мВ), при $N_{it}=500$ для СП ($U_{вх}=715,1$ мВ, $U_{max}=76,6$ мВ) (рисунок 3.11).

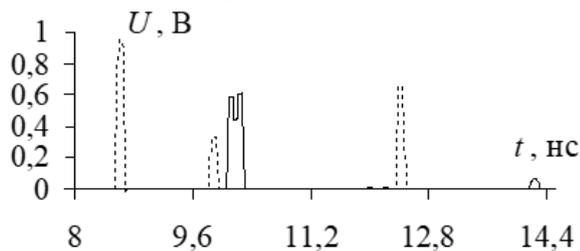


Рисунок 3.9 – Формы напряжения на выходе МФ 3 при оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭС (—) и ЭП (···)

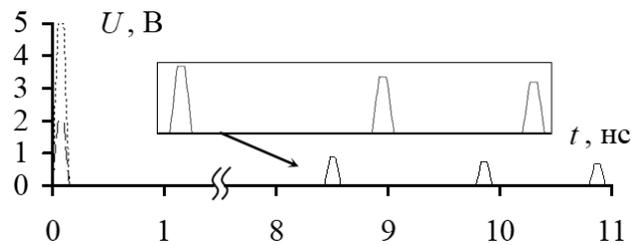


Рисунок 3.10 – Формы ЭДС (···), напряжений на входе (---) и выходе (—) МФ 3 при оптимизации по двум критериям

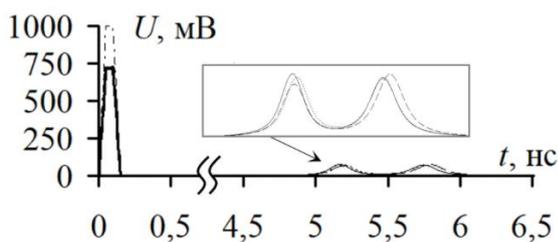


Рисунок 3.11 – Формы ЭДС (···), напряжений на входе (---) и выходе (—) МФ 12 после оптимизации посредством ЭС (···), ГА (—) и СП (---)

В подразделе 3.5 обобщены и систематизированы результаты оптимизации полосковых и кабельных МФ для оценки эффективности используемых алгоритмов и качества решений. Выполнен однофакторный дисперсионный анализ результатов оптимизации МФ 1 и 2, показавший статистически значимые различия между алгоритмами. Разработана система практических рекомендаций по использованию алгоритмов для различных МФ.

4. Экспериментальные исследования кабельных модальных фильтров

В подразделе 4.1 рассматривается методика создания прототипа МФ на основе круглого кабеля, включающая выбор и обоснование подходящей структуры и материалов, этапы изготовления и измерения его характеристик. Предварительно рассмотрены 4 кабельных МФ: МФ 5–8. Они оптимизированы

посредством ЭС по методике, описанной в подразделе 2.3. Оптимизация выполнялась одновременно по амплитудному, диапазонно-временному и критерию согласования. Оптимизировались: r_{12} , r_{13} , R_{Pi} и φ_i . Фиксированными параметрами при оптимизации приняты r_{11} , r_{10} , h_{10} , h_{11} , φ_A . При оптимизации h_{12} и h_{13} изменялись в соответствии с r_{12} и r_{13} . Радиус внешнего диэлектрика (r_3) изменялся в соответствии с размерами проводников во избежание их наложения при построении. Для всех МФ $l=1$ м, $R_T=R_H=R=50$ Ом. Воздействовал СКИ с ЭДС 5 В и $t_\Sigma=150$ пс.

Для изготовления прототипа выбран МФ 3 (при $U_{вх}=2,64$ В, $U_{max}=82,8$ мВ, $\Delta\tau_1=0,99$ нс/м, $\Delta\tau_2=2,45$ нс/м). Для изготовления использованы: трубка фторопластовая с внутренним диаметром 2 см и толщиной стенки 2 мм; провод марки ПВ-1 радиусом сечения 2,2 мм; лист фторопласта $4\times 300\times 300$ мм; компаунд на основе радиопоглощающего материала (РПМ) ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л. Начальная длина МФ $l=100$ мм. С использованием станка с числовым программным управлением, из листа фторопласта изготовлены круглые пластины с отверстиями для фиксации проводов по всей длине кабеля. Использовано 6 пластин (толщиной 4 мм каждая), располагаемых через 18 мм (± 1 мм). С учетом пластин, итоговая длина МФ составила 113 мм (рисунок 4.1).

Измерение частотных зависимостей $|S_{21}|$ (рисунок 4.2), на основе которых далее получены формы напряжений во временной области (рисунок 4.3), осуществлялось ВАЦ Р4М-18. Измерения характеристик МФ выполнялись с использованием переходных ПП (для соединения с SMA-соединителями) и без них, полученные результаты сравнивались с результатами моделирования в системах квазистатического и электродинамического моделирования.

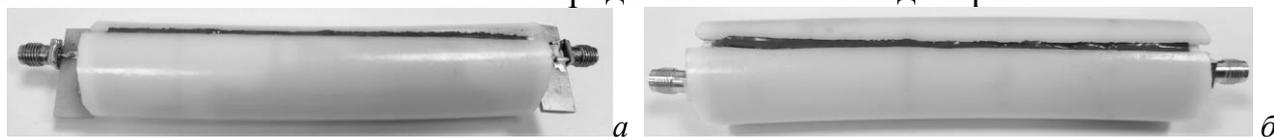


Рисунок 4.1 – Прототип МФ с ПП (а) и без них (б)

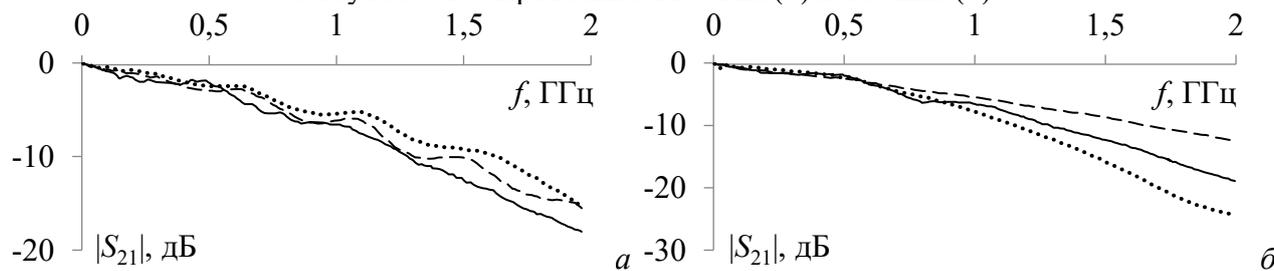


Рисунок 4.2 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ с ПП (а) и без них (б), полученные квазистатическим (---) и электродинамическим (···) анализом и измерениями (—)

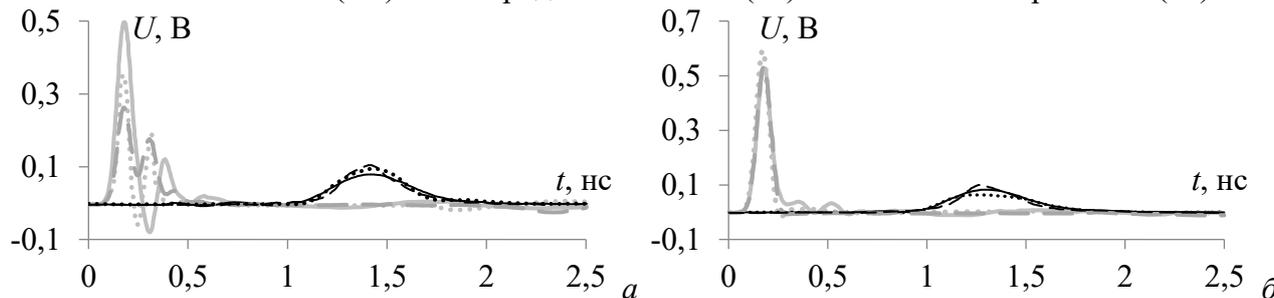


Рисунок 4.3 – Формы напряжения на входе (—) и выходе (---) МФ с ПП (а) и без них (б), полученные квазистатическим (---) и электродинамическим (···) анализом и измерениями (—)

С ПП характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ в полосе частот до 2 ГГц схож для всех видов анализа, без ПП – также, но при малых отличиях с 1,2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 580–700 МГц (с ПП) и 572–585 МГц (без ПП) для измерения и двух видов анализа. Так, МФ ослабляет воздействующую помеху с $t_{\Sigma}=80,5$ пс (по уровню 0,5) в 6,17 раза (с ПП) и в 6,1 раза (без ПП) по результатам измерения.

В подразделе 4.2 рассматривается методика создания прототипа МФ на основе плоского кабеля, включающая выбор и обоснование подходящей структуры и материалов, этапы изготовления и измерения его характеристик. Рассмотрены 4 структуры МФ на основе 2-проводных (без учета опорного проводника) плоских кабелей (МФ 9–12). Для изготовления выбран МФ 12 (при $U_{\text{вх}}=611,4$ мВ, $U_{\text{max}}=158,2$ мВ, $\Delta\tau=1,48$ нс/м). Выполнена оптимизация посредством ГА по ЦФ из трех критериев: амплитудного, согласования, диапазонно-временного, а затем ЭП для корректировки и реализации прототипа МФ. В результате, получено $s_1=5$ мм, $s_2=1$ мм, $h_3=0,885$ мм. Взяты $l=0,2$ м и $R_{\Gamma}=R_{\text{H}}=R=50$ Ом. Воздействовал СКИ с ЭДС 1 В и $t_{\Sigma}=300$ пс.

Для создания прототипа (рисунок 4.4) использованы лист фторопласта $10 \times 250 \times 100$ мм, провод марки ПуВнг(А)-LS с диаметром проводника 2,2 мм и толщиной изоляции 0,8 мм и компаунд на основе РПМ ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л. Изготовлены формы для фиксации и заливки проводов. Измерение частотных зависимостей $|S_{21}|$ осуществлялось ВАЦ Р4М-18 без ПП. На рисунок 4.5 сведены зависимости $|S_{21}|$ до частоты 2 ГГц. Формы выходных напряжений показаны на рисунке 4.6.



Рисунок 4.4 – Общий вид прототипа МФ

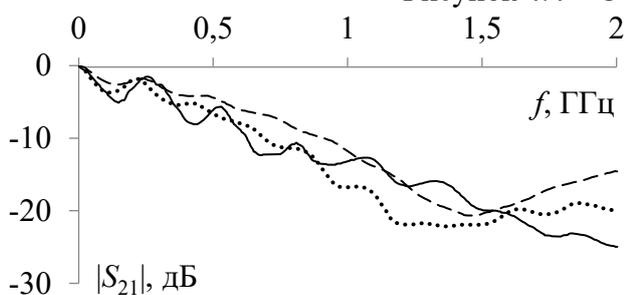


Рисунок 4.5 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ, полученные квазистатическим (---), электродинамическим (· · ·) анализом и измерениями (—)

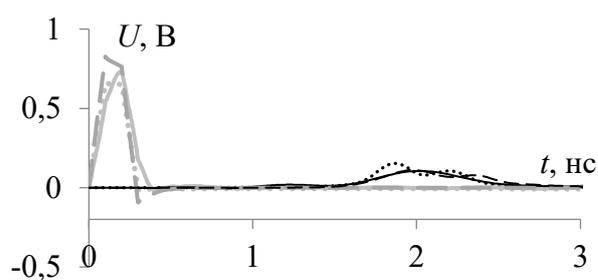


Рисунок 4.6 – Формы напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ, полученные квазистатическим (---), электродинамическим (· · ·) анализом и измерениями (—)

Полоса пропускания МФ составила 310 МГц при квазистатическом, 75,3 МГц – при электродинамическом анализе и 83,3 МГц при измерении. Получено $U_{\text{max}}=0,153$ В (при $U_{\text{вх}}=0,657$ В) по результатам квазистатического анализа, 0,111 В (при $U_{\text{вх}}=0,827$ В) – электродинамического и 0,105 В (при $U_{\text{вх}}=0,738$ В) по измерениям. В результате, разработанный МФ способен ослабить СКИ с t_{Σ} до 200 пс (по уровню 0,5) в 4,3 раза при квазистатическом анализе, 7,45 раза – электродинамическом и в 7,03 раза при измерении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования

1. Выполнено предварительное моделирование двух полосковых МФ, рекомендованы основные параметры для оптимизации.

2. Выполнено предварительное моделирование 10 МФ на основе круглых и плоских кабелей, рекомендованы основные параметры для оптимизации. Отмечено положительное влияние асимметрии на разложение СКИ в круглых МФ.

3. Сформулированы критерии оптимизации и нормировочные коэффициенты для них. Они учитывают частотные характеристики МФ, целостность передаваемого сигнала, а также двустороннее воздействие помехового сигнала.

4. Модифицирован алгоритм ЭС, путем реализации задания диапазонов оптимизируемых параметров, что предотвращает получение некорректных результатов оптимизации. Разработан новый алгоритм АУС, объединяющий в себе достоинства алгоритмов СП и ВГ.

5. Получены результаты оптимизации двух полосковых МФ по одному и двум критериям с использованием глобальных алгоритмов оптимизации: ГА, ЭС, СП, ВГ, ИО, SHGO и АУС. При оптимизации МФ 1–2 по амплитудному критерию достигнуто $U_{\max}=146,2$ мВ и 86,2 мВ посредством ГА и SHGO для МФ 1 и ГА для МФ 2. При этом результаты, полученные другими алгоритмами, включая разработанный АУС, отличаются менее, чем на 1%. При апробации частотных критериев на примере МФ 1 удалось увеличить $f_{\text{ср}}$ с 20,9 до 518,2 МГц (в 24,8 раза), а также достичь целевого значения $f_{\text{ср}}=425$ МГц посредством ГА, ЭС и СП. При оптимизации МФ 1 по критерию минимизации амплитуды с учетом распространения помехи с двух направлений удалось снизить U_{\max} в области суперпозиции импульсов разложения в 2,8 раза при воздействии СКИ, а также в 2,9 раза при воздействии с генераторов IRA II и SINUS-160. При оптимизации МФ 1 по глазковому критерию удалось раскрыть глазковую диаграмму на 2,8%, для МФ 2 – на 34%. При оптимизации МФ 1–2 по двум критериям максимальное отличие результатов, полученных разными алгоритмами, составляет 3%.

6. Апробирован подход к оптимизации МФ на основе круглых кабелей. В результате оптимизации МФ 3, 4 и 7 алгоритмом ЭС удалось снизить U_{\max} на 44,5, 40,5 и 35,3% относительно результатов оптимизации посредством ЭП. При оптимизации МФ 3 по двум критериям удалось снизить U_{\max} на 3,94% при увеличении $U_{\text{вх}}$ на 5,77%. При оптимизации МФ 12 посредством ГА, ЭС и СП удалось снизить U_{\max} на 16,6%, а $U_{\text{вх}}$ – на 1,11%. При этом, результаты всех трех алгоритмов отличаются менее, чем на 3%.

7. Представлено всестороннее сравнение результатов оптимизации полосковых и кабельных МФ по ряду критериев глобальными алгоритмами. Отмечены ключевые особенности и различия рассмотренных алгоритмов. Выполнен однофакторный дисперсионный анализ для результатов однокритериальной оптимизации МФ 1 и 2, показавший статистически значимые различия между алгоритмами. Разработана система практических рекомендаций по использованию алгоритмов для различных конфигураций МФ.

8. Создан прототип МФ на основе круглого кабеля, измерены его характеристики с ПП и без них. С ПП характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ в полосе частот до 2 ГГц схож для результатов квазистатического и электродинамического анализа и измерений, а полоса пропускания МФ находится в пределах 580–700 МГц. При этом МФ ослабляет воздействующую помеху с $t_{\Sigma}=80,5$ пс (по уровню 0,5) в 6,17 раза по результатам измерения, однако в начале временного отклика МФ наблюдаются отражения от неоднородностей. Без ПП уровень отражений значительно ниже. Характер зависимостей $|S_{21}|$ данного МФ в полосе частот с 1,2 ГГц до 2 ГГц также схож при малых отличиях. Полоса пропускания МФ находится в пределах 572–585 МГц. При этом МФ способен ослабить ту же воздействующую помеху в 6,1 раза по результатам измерения.

9. Создан прототип МФ на основе плоского кабеля, измерены его характеристики. Зависимости $|S_{21}|$ МФ схожи для результатов квазистатического и электродинамического анализа и измерений с максимальным отклонением 5,2 дБ (на частоте 650 МГц для квазистатического анализа и измерений) в полосе до 2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 75–310 МГц. МФ способен ослабить СКИ с t_{Σ} до 200 пс (по уровню 0,5) в 7 раз по результатам измерения.

Рекомендации

1. МФ на основе кабельных структур могут быть использованы при разработке специализированного электронного оборудования для защиты РЭС от СКИ по цепям питания и сигнальным цепям как в виде отдельного устройства, так и в совокупности с уже имеющимися.

2. Разработанные критерии и алгоритмы оптимизации, ввиду своей универсальности, могут быть использованы при оптимизации различных МФ.

3. Подходы к моделированию и оптимизации могут быть использованы в образовательном процессе высших учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Одновременная оптимизация по критериям, реализованным во временной и частотной областях.

2. Дальнейшее развитие алгоритма АУС, направленное на внедрение дополнительных правил, способствующих ускорению сходимости и повышению точности оптимизации.

3. Расширение ряда возможных КО в алгоритме АУС, например, достижение сходимости ЦФ или ограничения по максимальному времени расчёта.

4. Оптимизация МФ на основе круглых и плоских кабелей под конкретные цепи и устройства для их дальнейшего внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК (6)

1. Белоусов, А.О. Анализ характеристик трёхпроводного модального фильтра в экстремальных условиях фильтров / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 64–82.

2. Белоусов, А.О. Сравнение генетического алгоритма и эволюционных стратегий при оптимизации полосковых модальных фильтров / А.О. Белоусов,

В.О. Гордеева // Радиотехника и электроника. – 2023. – № 11 (68). – С. 1079–1089.

3. Белоусов, А.О. Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным критериям / А.О. Белоусов, **В.О. Гордеева**, Г.Ю. Ким // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 4. – С. 219–242.

4. **Гордеева, В.О.** Экспериментальные исследования модального фильтра на основе круглой кабельной структуры / **В.О. Гордеева**, А.О. Белоусов // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 173–192.

5. **Гордеева, В.О.** Оптимизация конструкции модального фильтра при распространении сверхкоротких импульсов с двух направлений / **В.О. Гордеева**, А.О. Белоусов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2024. – № 3 (27). – С. 48–55.

6. Белоусов, А.О. Применение современных моделей машинного обучения для повышения эффективности оптимизации полосковой и кабельной помехозащитных структур / А.О. Белоусов, Г.Ю. Ким, **В.О. Гордеева** // Радиотехника. – 2025. – № 4 (89). – С. 61–77.

Публикация в журнале, индексируемом в WoS и Scopus, Q2 (1)

7. Belousov, A.O. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses / A.O. Belousov, N.O. Vlasova, **V.O. Gordeyeva**, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14(6), No. 1228. – P. 1–34.

Публикации в других журналах, индексируемых в WoS и Scopus (3)

8. Belousov, A. Optimization of Microstrip Structures with Modal Phenomena Using Metaheuristic Iterative Global Optimization Algorithms / A. Belousov, **V. Gordeyeva** // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – P. 51–58.

9. Belousov, A.O. Optimization of Protective Devices with Modal Phenomena Using Global Optimization Algorithms / A.O. Belousov, **V.O. Gordeyeva** // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2024. – Vol. 16, Suppl. 1. – P. S12–S35.

10. Belousov, A.O. Basic Approaches to Optimization of Round and Flat Cable Structures for Protection against Ultra-Wideband Interference / A.O. Belousov, **V.O. Gordeyeva** // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. – 2025. – Vol. 7, No. 2. – P. 55–60.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus (5)

11. **Gordeyeva, V.O.** Optimization of a 3-conductor Modal Filter with a Circular Cross Section by Evolutionary Strategies with Limitations / **V.O. Gordeyeva**, А.О. Белоусов, N.O. Vlasova // Proc. of 23 Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2022). – Erlagol, Altai, June 30–July 4, 2022. – P. 1–5.

12. **Gordeyeva, V.O.** Optimization of a broad-side coupling modal filter by evolutionary strategy algorithm with setting the ranges of the optimization parameters / **V.O. Gordeyeva**, А.О. Белоусов // Journal of Physics: conference Series. – 2022. – Vol. 2291, No. 1. – P. 1–8.

13. **Gordeyeva, V.O.** Optimization of strip modal filters by random search method / **V.O. Gordeyeva**, A.O. Belousov // Proc. of Int. Siberian conf. on control and communications (SIBCON–2022). – Russia, Tomsk, November 17–19, 2022. – P. 1–5.

14. **Gordeyeva, V.O.** Multicriteria Optimization of Modal Filters Using Evolutionary Algorithms and Random Search Method / **V.O. Gordeyeva**, A.O. Belousov // Proc. of 24 Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2023). – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2023. – P. 1–6.

15. Kim, G.Yu. Enhancing the Efficiency of Optimization of Modal Filters Based on Microstrip Lines Using Regression Machine Learning Models / G.Yu. Kim, A.O. Belousov, **V.O. Gordeyeva** // Proc. of 3rd Int. conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – Russia, Novosibirsk, November 15–17, 2024. – P. 880–885.

Доклад в трудах отечественной конференции (1)

16. Белоусов, А.О. Оптимизация модального фильтра с лицевой связью по алгоритму эволюционных стратегий с ограничениями / А.О. Белоусов, **В.О. Гордеева** // Материалы XVII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – г. Томск, ноябрь 19–21, 2021. – С. 13–17.

Монография (1)

17. Белоусов, А.О. Оптимизация помехозащитных структур с модальным разложением: моногр. / А.О. Белоусов, **В.О. Гордеева**. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2023. – 136 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (11)

18. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022682728. Оптимизация эволюционными стратегиями с ограничениями трехпроводного модального фильтра с боковой связью / **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2022682305; заявл. 22.11.22; зарег. 25.11.22.

19. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022684197. Оптимизация эволюционными стратегиями с ограничениями трехпроводного модального фильтра с круговым сечением. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2022682332; заявл. 22.11.22; зарег. 12.12.22 г.

20. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023661306. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии методом случайного поиска. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2023660003; заявл. 19.05.23; зарег. 30.05.23 г.

21. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023661858. Многокритериальная оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии эволюционными стратегиями. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2023619949; заявл. 19.05.23; зарег. 02.06.23 г.

22. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023662109. Многокритериальная оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии методом случайного поиска. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2023660005; заявл. 22.05.23; зарег. 06.06.23 г.

23. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024660221. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии по критерию максимизации полосы пропускания полезного сигнала. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2024618752; заявл. 23.04.24; зарег. 03.05.24 г.

24. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024660650. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии по критерию контроля полосы пропускания полезного сигнала. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2024618770; заявл. 23.04.24; зарег. 08.05.24 г.

25. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688250. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии при распространении сверхширокополосной помехи с двух направлений. Авторы: **Гордеева В.О.**, Белоусов А.О. – Заявка № 2024687280; заявл. 14.11.24; зарег. 26.11.24 г.

26. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025664990. Оптимизация модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии методом имитации отжига. Авторы: **Гордеева В.О.** – Заявка № 2025663728; заявл. 29.05.25; зарег. 09.06.25 г.

27. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025664701. Оптимизация модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии по глазковому критерию. Авторы: **Гордеева В.О.** – Заявка № 2025663737; заявл. 29.05.25; зарег. 05.06.25 г.

28. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025665785. Оптимизация модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии методом ветвей и границ. Авторы: **Гордеева В.О.** – Заявка № 2025663771; заявл. 29.05.25; зарег. 19.06.25 г.

Патенты на изобретение (2)

29. Пат. на изобретение № 2781266 РФ. Способ исполнения модального фильтра с уголковым пассивным проводником / Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Власова Н.О., **Гордеева В.О.** – Заявка № 2022109601; заявл. 12.04.22; опубл. 11.10.22; Бюл. №29.

30. Пат. на изобретение № 2828831 РФ. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе кабельной структуры / Белоусов А.О., **Гордеева В.О.** – Заявка № 2024112422; заявл. 07.05.24; опубл. 21.10.24; Бюл. №30.