

На правах рукописи



Суровцев Роман Сергеевич

**Модальное разложение в полосковых меандровых линиях
для защиты радиоэлектронных средств
от кондуктивных импульсных помех
субнаносекундной длительности**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск – 2024

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

Научный консультант – **Газизов Тальгат Рашитович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой телевидения и управления ТУСУР

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

Горбачёв Анатолий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих
устройств ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический 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 24 сентября 2024 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/d1xnkq06>

Автореферат разослан ____ мая 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Достижения в радиоэлектронике послужили внедрению радиоэлектронных средств (РЭС) во все сферы деятельности. Развитие РЭС привело к появлению такого направления, как электромагнитная совместимость (ЭМС). Его актуальность вызвана возросшей восприимчивостью РЭС к электромагнитным воздействиям (ЭМВ) из-за повышения быстродействия и миниатюризации. Другая причина состоит во внедрении микропроцессорных устройств в РЭС, что снизило напряжения и токи сигналов. Неучёт требований ЭМС при проектировании РЭС может привести к их выходу из строя и, как следствие, финансовым потерям и человеческим жертвам. Рост восприимчивости РЭС к ЭМВ привел к угрозе электромагнитного терроризма, состоящей в преднамеренном оказании в террористических целях мощного ЭМВ на электронные и электрические системы с целью нарушения их нормального функционирования. Среди ЭМВ опасны мощные сверхширокополосные (СШП) импульсы с временем нарастания менее 100 пс, наносекундной длительностью и частотным диапазоном до 10 ГГц. Широкий спектр таких сверхкоротких импульсов (СКИ) способствует проникновению их частотных компонент сквозь апертуры экранов, из-за чего индуцируются токи высокой амплитуды, вызывающие дефектообразование в зонах выделения тепла. Поэтому актуальность защиты РЭС от СКИ возрастает.

К схемотехническим решениям защиты от ЭМВ относятся ограничители помех, газоразрядники, трансформаторная, ёмкостная и другие виды развязки, а также разнообразные фильтры, а к конструктивным – экранирование и методы повышения однородности экранов, схемы заземления и другие методы. Новым решением является разложение СКИ на составляющие, менее опасные для РЭС. Разложение возникает в связанных линиях из-за взаимовлияний их проводников, которыми выступают межсоединения печатных плат, круглые силовые кабели и гибкие печатные кабели. Подход назван модальной фильтрацией, а устройства на его основе – модальными фильтрами (МФ). Между тем среди устройств с той же спецификой выделяются устройства на основе витка меандровой линии (МЛ), которые обладают рядом преимуществ по сравнению с МФ.

Степень разработанности темы

Разработке методов анализа многопроводных линий передачи посвятили работы A.R. Djordjevic, E.G. Farr, S. Frankel, M.S. Nakhla, S.W. Park, M. Soma, C.R. Paul, F.M. Tesche, H. You и др., а среди отечественных учёных – М.Х. Захар-Иткин, С.И. Кравченко, В.М. Красноперкин, Н.А. Леонтьев, Р.А. Силин и др. Разработкой математических методов в области численного моделирования занимались зарубежные учёные T.K. Sarkar, Y. Saad, H.A. van der Vorst, J. Dongarra, а среди отечественных значимый вклад в их развитие сделали С.А. Горейнов, В.П. Ильин, Л.Ю. Колотилина, С.П. Куксенко, Е.Е. Тыртышников и др.

Известными зарубежными исследователями мощных СШП воздействий являются D.V. Giri, J. Haseborg, N. Mora, F. Rachidi, W. Radasky, F. Sabath и др. Среди отечественных учёных анализ стойкости РЭС к ЭМВ вели Б.Б. Акбашев, Л.Н. Здухов, Л.Н. Кечиев, В.Ю. Кириллов, Л.Н. Парфёнов, В.А. Черепенин и др., а влияния СШП воздействий на вычислительную технику – З.М. Гизатуллин,

Р. Киричек, С.Ф. Чермошенцев и др. Помехозащитные фильтры с распределенными параметрами исследовали М. Camp, R. Krzikalla, T. Weber и др. Из отечественных учёных, связанные линии исследовали Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов, А.М. Сержантов, А.Н. Сычев и др. Модальные явления исследуются в ТУСУРе под руководством Т.Р. Газизова. Анализ модального разложения в многопроводных линиях ведут А.О. Белоусов, Е. Жечев, А.М. Заболоцкий, В.П. Костелецкий и Е.Б. Черникова.

Отдельным направлением стало разложение СКИ в устройствах на основе МЛ. Этому посвящены работы С. Карри, З.М. Кенжегуловой и А.В. Носова. Несмотря на ряд исследований полосковых устройств для защиты, в частности на основе витка МЛ, **проблема** эффективной защиты РЭС от СКИ не решена.

Цель работы – разработать метод эффективной защиты РЭС от СКИ. Для этого надо выполнить предварительный анализ межсоединений реальных печатных плат, систематизировать исследования по использованию модального разложения в меандровых линиях для ослабления импульсных воздействий с предложением устройств на его основе, разработать новые модели и алгоритмы для анализа устройств на основе связанных полосковых линий с модальным разложением, создать методики оптимизации и проектирования таких устройств и экспериментально подтвердить созданную методику проектирования.

Научная новизна

1. Предложены полосковые устройства, отличающиеся модальным разложением импульсного воздействия на составляющие в витке меандровой линии и выравниванием их амплитуд (21 патент на изобретение).

2. Разработан комплекс алгоритмов и моделей для анализа полосковых устройств с модальным разложением, отличающийся применением блочного LU-разложения для ускорения многократного вычисления ёмкостной матрицы в диапазоне параметров и аналитических моделей временного отклика, полученных в замкнутом виде.

3. Аналитически доказана инвариантность равенства амплитуд доминирующих составляющих временного отклика асимметричного двухпроводного модального фильтра, без учёта потерь и дисперсии, к изменению сопротивлений на концах активного проводника и достижимость этого равенства подбором сопротивлений на концах пассивного проводника.

4. Для ряда меандровых линий и модальных фильтров впервые доказана возможность выравнивания амплитуд доминирующих составляющих разложения импульсного воздействия без вычисления временного отклика.

5. Предложена методика параметрической оптимизации полосковых устройств на основе связанных линий с модальным разложением, отличающаяся использованием в качестве критериев условий равенства амплитуд составляющих временного отклика на выходе устройства.

6. Предложена методика проектирования помехозащитных полосковых устройств с модальным разложением, отличающаяся применением предложенной методики параметрической оптимизации, аналитического расчёта формы выходного напряжения по моделям в замкнутом виде и N -норм для оценки эффективности ослабления помехи.

Теоретическая значимость

1. Разработаны алгоритмы, расширяющие теоретический инструментарий подходов к многократному вычислению ёмкостной матрицы методом моментов в диапазоне параметров.

2. Разработаны аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальным разложением: двух- и трёхпроводного модального фильтра и витка меандровой линии.

3. Получены значения коэффициента связи, обеспечивающие равенство амплитуд доминирующих составляющих временного отклика на выходе витка меандровой линии для трех случаев разложения.

4. Получены условия равенства амплитуд доминирующих составляющих временного отклика на выходе разных полосковых устройств с модальным разложением.

5. Выявлены особенности влияния асимметрии поперечного сечения на возникновение и распространение дополнительных импульсов в устройствах на основе полосковых структур, в том числе многокаскадных.

6. Доказана эффективность применения генетических алгоритмов и эволюционных стратегий для проектирования устройств защиты от импульсных воздействий на основе связанных полосковых линий с модальным разложением.

Практическая значимость

1. Предложена методика квазистатического анализа многопроводных межсоединений печатных плат для оценки взаимовлияний в них.

2. Показана возможность минимизации уровня перекрестных помех (с уменьшением в 2 раза) в многопроводных межсоединениях реальных (учитывающих реальные стек платы, окончания и число проводников больше 4) печатных плат за счёт диэлектрических покрытий оптимальной толщины.

3. Показана возможность минимизации импеданса цепи питания соединителей РЭС до 2 раз за счёт распределения контактов.

4. Разработаны и внедрены в отечественную систему компьютерного моделирования задач электромагнитной совместимости усовершенствованные с помощью блочного LU-разложения алгоритмы, уменьшающие время многократного вычисления ёмкостной матрицы и временного отклика, а также аналитические модели, уменьшающие время вычисления временного отклика.

5. Результаты использованы в АО «НПЦ «Полус», АО «РЕШЕТНЁВ», ООО «Эремекс», в учебном процессе двух университетов и научных проектах.

Положения, выносимые на защиту

1. Модальное разложение импульсного воздействия в витке меандровой линии с выравниванием амплитуд его доминирующих составляющих ослабляет воздействие в 1,6–6,3 раза.

2. Блочное LU-разложение ускоряет решение систем линейных алгебраических уравнений (до 47 раз), вычисление ёмкостной матрицы (до 8,8 раза) и временного отклика по алгоритмической модели (до 2,15 раза) в диапазоне параметров линии передачи.

3. Равенство амплитуд доминирующих составляющих временного отклика на выходе асимметричного двухпроводного модального фильтра, без учёта

потерь и дисперсии, не зависит от сопротивлений на концах его активного проводника и достижимо подбором сопротивлений на концах пассивного проводника.

4. Выравнивание амплитуд доминирующих составляющих разложения импульсного воздействия в ряде меандровых линий и модальных фильтров, без учёта потерь и дисперсии, не требует вычисления временного отклика.

5. Использование условий равенства нормированных амплитуд доминирующих составляющих временного отклика на выходе полосковых устройств с модальным разложением уменьшает время параметрической оптимизации исследованных устройств эволюционными алгоритмами до 300 раз.

6. Применение предложенной методики параметрической оптимизации, аналитического расчёта формы выходного напряжения по моделям в замкнутом виде и вычисления N -норм для оценки эффективности ослабления ускоряет синтез помехозащитных полосковых устройств с модальным разложением с оптимальными параметрами.

Методология и методы исследования. В работе применены квазистатический и электродинамический виды анализа, численное моделирование методами моментов, матриц линий передачи и конечных разностей во временной области, прямые методы решения систем линейных алгебраических уравнений, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и эволюционными алгоритмами, натурный эксперимент на базе современного измерительного оборудования, а также метод валидации выделением особенностей для оценки совпадения результатов моделирования и измерений.

Достоверность результатов основана на совпадении результатов аналитического и квазистатического моделирования и их согласованности с результатами электродинамического моделирования и измерений, выполненных на базе сертифицированных аппаратно-программных комплексов, валидации результатов стандартизированным методом.

Использование результатов исследований (15 актов внедрения)

1. ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной совместимости и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор 95/10 от 24.11.2010 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

2. ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

3. Проект «Развитие объектов инновационной инфраструктуры ТУСУРа, включая технологический бизнес-инкубатор, обеспечивающей укрепление кооперации университета с промышленными предприятиями в создании высоко-

технологичных производств и целевой подготовке кадров по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий РФ» в рамках реализации Постановления 219 Правительства РФ в 2011–2012 гг.

4. Подпроект 2.2.1.3 «Разработка комплекса учебно-методического и программного обеспечения для исследования и проектирования инновационных устройств с учётом электромагнитной совместимости» на 2013 г. в рамках реализации программы стратегического развития ТУСУРа 2012–2016 гг.

5. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

6. НИР «Разработка математических моделей для трассировки меандровых линий задержки с оптимальными параметрами», договор № Р-20130122 от 18.01.2013 с ООО «Эремекс».

7. НИР «Комплексные исследования по разработке алгоритмов, математического обеспечения и средств проектирования для создания новых элементов защиты и контроля вычислительных систем на основе модальных явлений», грант РФФИ 14-29-09254, 2014–2016 гг.

8. НИР «Выявление, исследование и реализация новых возможностей уменьшения времени многократного решения СЛАУ с частично изменяющейся матрицей в задачах вычисления емкостной матрицы произвольной системы проводников и диэлектриков», грант РФФИ 14-07-31267, 2014–2015 гг.

9. НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РФФИ 14-19-01232, 2014–2016 гг.

10. НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

11. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов», проект №8.9562.2017, 2017–2019 гг.

12. НИР «Методология обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры на основе модальных технологий», грант РФФИ «Стабильность» 20-37-70020, 2019–2021 гг.

13. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ 19-79-10162, 2019–2022 гг.

14. НИР «Моделирование распространения сверхкоротких импульсов в многопроводных линиях передачи для решения задач проектирования радиоэлектронной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости», грант РФФИ «Научное наставничество» 19-37-51017, 2019–2021 гг.

15. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования. Научно-исследовательская лаборатория фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС), проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.

16. НИР «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент», проект FEWM-2020-0039, 2020–2022 гг.

17. НИР «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях», проект FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.

18. НИР «Комплекс теоретических и экспериментальных исследований возможности разработки новой технологии защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов на основе простых печатных структур», грант РФФИ 18-37-00339, 2018–2020 гг. **Руководитель.**

19. НИР «Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для задач моделирования помехового синусоидального воздействия на печатные устройства защиты при проектировании радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости» МК-396.2022.4, 2022–2023 гг. **Руководитель.**

20. НИР «Математический аппарат для синтеза пассивных помехоподавляющих полосковых устройств с асимметричной структурой на основе модальных технологий», грант РФФИ 21-79-00161, 2021–2023 гг. **Руководитель.**

21. Учебный процесс НИ ТГУ: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Космические промышленные системы» для предприятия «Газпром космические системы», г. Королев, 2015 г.

22. Учебный процесс РФ ТУСУР (на кафедрах ТУ и СВЧКР).

23. Результаты интеллектуальной деятельности: получены 21 патент на изобретение и 20 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Апробация результатов

Результаты позволили подготовить заявки, победившие в 16 конкурсах: 5 грантов РФФИ; 4 гранта РФФИ; 5 государственных заданий; ФЦП ИР; гранта Президента РФ.

Результаты представлялись в материалах следующих конференций: всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», 2011–2013, 2015, 2016, 2018, 2019–2021 гг.; общерос. молодёжн. науч.-техн. конф. «Молодёжь. Техника. Космос», 2013, 2014 гг.; междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 2015, 2018–2022 гг.; науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства», 2018 г.; междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС)», 2017, 2019–2022 гг.; всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)», 2022 г.; Int. conf. on applied physics,

simulation and computers, 2015 г.; Int. conf. on modeling, simulation and applied mathematics, 2015 г.; Int. conf. of numerical analysis and applied mathematics, 2015 г.; Int. siberian conf. on control and communications (SIBCON), 2015, 2019, 2022 гг.; Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON), 2017, 2019 и 2022 гг.; Int. scient. and tech. conf. «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», 2016, 2017, 2021 гг.; Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), 2015–2017, 2019–2023 гг.; Moscow workshop on electronic and networking technologies (MWENT), 2018 г.; Int. scient. conf. «Advances in science, engineering and digital education» (ASEDU), 2022 г.; Ural symp. on biomedical engineering, radioelectronic and information technology (USBEREIT), 2022, 2023 гг.; Int. Ural conf. on electrical power engineering (UralCon), 2022 г.; Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM), 2023 г.

Личный вклад. Автору принадлежит ключевая роль в получении основных результатов. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии. Авторский вклад заключается в исследовании параметров полосковых устройств на основе связанных линий с модальным разложением, разработке алгоритмов для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) при анализе связанных линий, аналитических моделей временного отклика полосковых устройств, условий равенства и моделей нормированных амплитуд составляющих отклика на выходе полосковых устройств, методик оптимизации и проектирования устройств защиты на основе связанных линий. Исследования модального разложения в меандровых линиях выполнены совместно с *Носовым А.В.* Исследование алгоритмов решения СЛАУ на основе блочного LU-разложения выполнено совместно с *Куксенко С.П.* Отдельные результаты получены совместно с соавторами публикаций.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 160 научных работ (10 без соавторов): 25 статей в журналах из перечня ВАК; 15 статей в журналах, индексируемых Scopus и (или) Web of Science; 2 доклада в трудах конференций из перечня ВАК, 29 докладов в трудах конференций, индексируемых в Scopus и (или) Web of Science; 1 статья в рецензируемом журнале; 44 доклада в трудах других конференций; 21 патент на изобретение; 20 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 3 монографии.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 6 разделов, заключение, список сокращений и обозначений, список источников из 619 наименований и 2 приложения. Объем диссертации с приложениями составляет 366 с., в т.ч. 205 рисунков и 78 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Устройства защиты от электромагнитных воздействий и методы их анализа и оптимизации: обзор

В разделе 1.1 показана актуальность защиты РЭС от мощных СШП воздействий. В разделе 1.2 приведены источники и классификация преднамеренных ЭМВ. В разделе 1.3 представлены решения для защиты РЭС от ЭМВ и выделены полосковые устройства с модальным разложением. В разделе 1.4 при-

ведены подходы к анализу произвольных структур проводников и диэлектриков. В разделе 1.5 приведены методы и методики параметрической оптимизации РЭС. В разделе 1.6 сформулированы цель и задачи работы.

2. Предварительный анализ межсоединений печатных плат

В разделе 2.1 оценено влияние покрытий на характеристики одиночной микрополосковой линии (МПЛ), изменяющее их погонную задержку до 42%, а волновое сопротивление – до 29,5%. Исследованы параметры связанной МПЛ на основе разных диэлектриков. Оценено влияние температуры (от минус 50 до 150°C) на характеристики связанных линий, показавшее малое (менее 1%) изменение геометрических параметров поперечного сечения и существенное (до 10%) изменение ϵ_r . В разделе 2.2 выполнен анализ многопроводных межсоединений реальных печатных плат (ПП). Предложена методика квазистатического анализа межсоединений ПП, по ней проанализирована целостность сигналов реальных ПП. Показан оптимальный выбор толщины диэлектрического покрытия ПП для компенсации перекрестных помех в многопроводном межсоединении, уменьшивший их амплитуду в 2 раза.

3. Метод защиты от импульсного воздействия

в витке меандровой линии и устройства на его основе

В разделе 3.1 рассмотрено распространение импульса по витку МЛ в неоднородном диэлектрике без искажений из-за различия задержек мод. Условие их минимизации –

$$\tau_e = \tau_o, \quad (3.1)$$

где τ_e и τ_o – погонные задержки чётной и нечётной мод витка МЛ.

Для исключения влияния перекрестной помехи на форму импульса нужно выбором длины полувитка l обеспечить задержку не менее суммы длительностей его фронта (t_r), плоской вершины (t_d) и спада (t_f):

$$2\tau l \geq t_\Sigma, \quad (3.2)$$

где $\tau = \tau_e = \tau_o$ при условии (3.1), а $t_\Sigma = t_r + t_d + t_f$.

Для проверки этого выполнен квазистатический анализ витка МЛ с покрывающим диэлектриком (рисунок 3.1). Выбором параметров обеспечены (3.1) и (3.2) при $t_\Sigma = 300$ пс. $R1$ и $R2$ приняты равными диагональным элементам матрицы импедансов \mathbf{Z} . На выходе получен импульс без искажений.

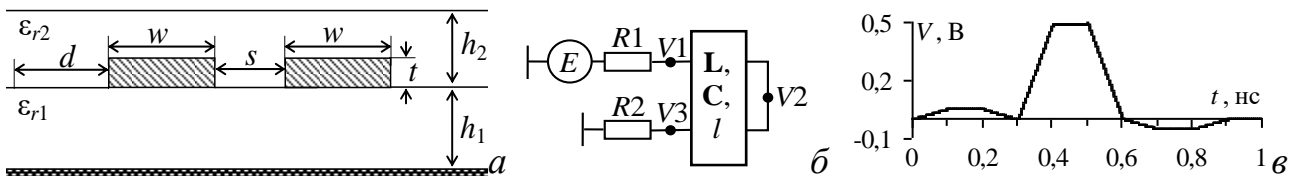


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) и отклик (в) витка МЛ

Затем выполнен эксперимент. Для этого изготовлена ПП из FR-4 с витками МЛ с задержкой от 0,1 до 1 нс. Измерения выполнены на базе комбинированного осциллографа С9-11. На рисунке 3.2а показан фрагмент ПП на основе МПЛ без покрытий с витком длиной 150 мм и задержкой 1 нс. Его параметры обеспечивают согласование с трактом 50 Ом. Схема соответствует рисунку 3.1б. Сначала с генератора подан импульс длительностью 440 пс по уровню

0,5 от амплитуды 720 мВ (рисунок 3.2б, слева). Затем в тракт между выходом генератора и входом осциллографа виток включён. В начале фронта появилась ступенька с амплитудой 53 мВ, являющаяся перекрестной помехой (рисунок 3.2б, справа). Затем длительность импульса уменьшена до 280 пс. Импульс перекрестной помехи отделился от фронта основного импульса (рисунок 3.2в).

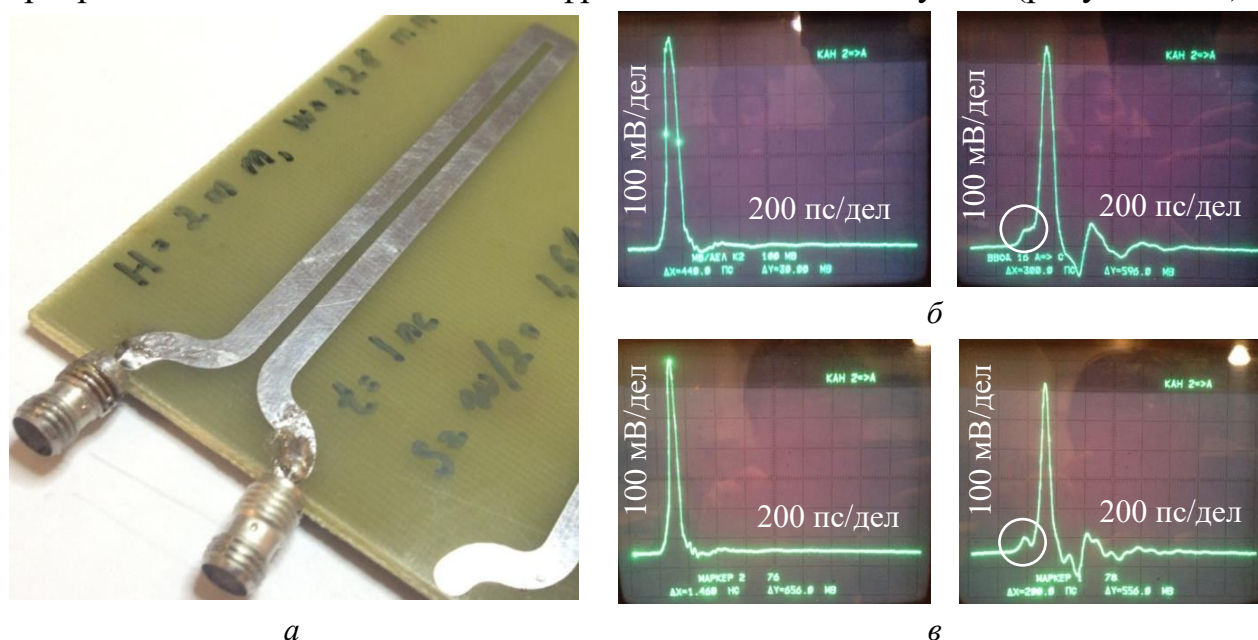


Рисунок 3.2 – Фрагмент ПП с витком МЛ (*а*) и осциллограммы на выходе генератора (слева) и витка (справа) при длительностях воздействия 440 (*б*) и 280 (*в*) пс

Таким образом, экспериментально доказана возможность распространения импульса по витку без искажения ближней перекрестной помехой.

В разделе 3.2 исследована дополнительная задержка импульса в витке МЛ, по сравнению с задержкой в одиночной линии. Она показана моделированием, также выявившим незначительные искажения фронта и спада импульса.

В разделе 3.3 представлен принцип разложения СКИ на составляющие для защиты от него. Сначала рассмотрен виток в воздухе при условии (3.2) и показано выравнивание амплитуд составляющих (перекрестной помехи и основного сигнала) за счёт выбора связи (оптимальным расстоянием между полувитками), уменьшающее его амплитуду в 1,62 раза.

Затем рассмотрен виток МПЛ, где погонные задержки мод разные, поэтому (3.1) не обеспечивается. Тогда (3.2) нужно переписать в виде

$$2l\tau_{\min} > t_{\Sigma}, \quad (3.3)$$

где τ_{\min} – наименьшая из погонных задержек мод.

Моделирование показало, что для минимизации амплитуды на выходе витка МПЛ недостаточно обеспечить (3.2). Для этого нужно обеспечить условие модального разложения сигнала на составляющие:

$$2l(\tau_2 - \tau_1) > t_{\Sigma}, \quad (3.4)$$

где τ_1 и τ_2 – погонные задержки быстрой и медленной мод соответственно.

Оптимизацией найдено расстояние между полувитками, дающее равные амплитуды трёх составляющих с ослаблением 2,41 раза. Для демонстрации этого вычислены формы выходного напряжения разными подходами.

Затем рассмотрен асимметричный виток с лицевой связью (рисунок 3.3а) и выявлены закономерности модального разложения импульса в нём. Выявлено, что на выход, кроме перекрестной помехи и двух составляющих мод, приходит дополнительная составляющая с задержкой, равной полусумме задержек мод. Для такого витка (3.4) примет вид

$$l(\tau_2 - \tau_1) \geq t_{\Sigma}. \quad (3.5)$$

Дополнительная составляющая является ресурсом для уменьшения уровня выходного напряжения за счёт выравнивания её амплитуды и других составляющих. Найдены значения оптимальных параметров витка, уменьшающих амплитуду напряжения в 3 раза (рисунок 3.3б).

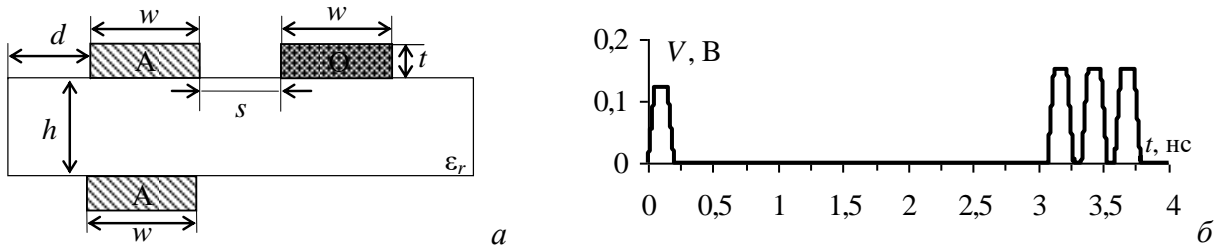


Рисунок 3.3 – Поперечное сечение асимметричного витка МЛ с лицевой связью (а) и форма напряжения (б) на его выходе при оптимальных параметрах

Таким образом, показано разложение импульса в витке МЛ с лицевой связью на 4 составляющие. Появление дополнительной составляющей даёт ещё меньшую амплитуду напряжения.

Затем на С9-11 экспериментально подтверждено ослабление импульса в витке МПЛ. Для этого изготовлены прототипы витка с разными расстояниями между полувитками ($s=300, 250, 200, 150$ мкм) на основе FR-4 толщиной 2 мм ($t=35$ мкм) и $\epsilon_r \approx 5$. Параметры витка (рисунок 3.1а) оптимизированы для согласования с трактом 50 Ом и по условию (3.4). Длительность воздействия – 40 пс по уровню 0,5 от амплитуды э.д.с. (527 мВ). Формы выходного напряжения для измерений и квазистатического моделирования с учётом потерь при $s=300$ и 150 мкм показаны на рисунке 3.4.

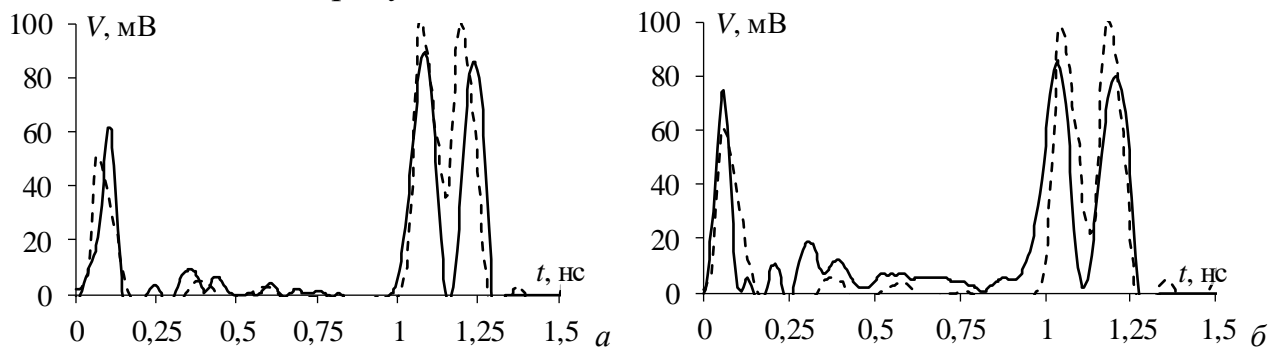


Рисунок 3.4 – Вычисленные (---) и измеренные (—) формы напряжения на выходе прототипов витка МЛ при $s=300$ (а), 150 (б) мкм

Формы напряжения согласуются: каждая представлена тремя составляющими. Наблюдается большее влияние потерь на амплитуду более поздних составляющих при измерении. Ослабление амплитуды при моделировании составило 5,6 раза, а измерениях – 6,3 раза. В таблицу 3.1 сведены амплитуды ($V1, V2, V3$) и разности задержек импульсов 2 и 1 ($\Delta\tau_{21}=\tau_2-\tau_1$), а также 3 и 2 ($\Delta\tau_{32}=\tau_3-\tau_2$).

Таблица 3.1 – Вычисленные амплитуды (мВ) составляющих отклика и разности задержек (пс) между их вершинами на выходе прототипов витка

s , мкм	Метод	V_1	V_2	V_3	$\Delta\tau_{21}$	$\Delta\tau_{32}$
300	Моделирование	51	100,5	100,5	1015	120,4
	Измерения	67,1	93,8	87	1016	160
150	Моделирование	61	98,5	101	992	138,2
	Измерения	79	84	81	1012	172

Из таблицы 3.1 видно, что уменьшение s увеличивает амплитуду составляющей 1 и уменьшает для 2 и 3, что подтверждает возможность их выравнивания и уменьшения выбором s . Максимальные отличия амплитуд (до 25%) выявлены для составляющих 1 и 3, а для составляющей 2 оно менее 17% и связано со схожим характером влияния потерь в проводниках при моделировании и измерениях. Отличие разностей задержек (до 25%) вызвано влиянием потерь.

Дополнительно измерено искажение сигналов с OFDM модуляцией на примере сигнала телевизионного стандарта DVB-T2 в витке МЛ на основе МПЛ. Выявлено, что максимальное ослабление полезного сигнала на выходе витка не превышает 3 дБ и он применим в цифровых системах связи.

Затем изготовлены и измерены прототипы асимметричного витка с лицевой связью при $l=100, 150, 200$ мм. Длительность воздействия – 40 пс по уровню 0,5 от амплитуды э.д.с. (615 мВ). Формы выходного напряжения в результате квазистатического моделирования с потерями и измерений при $l=100$ мм показаны на рисунке 3.5. Видно, что вычисленные и измеренные формы напряжения согласуются. Наблюдается практически полное наложение составляющей 1 с задержкой около 180 пс из-за влияния соединителей. Формы составляющих 2 и 3 согласуются хуже из-за большего влияния потерь и отражений. Амплитуда напряжения определяется перекрестной помехой (около 145 мВ, ослабление 4,2 раза).

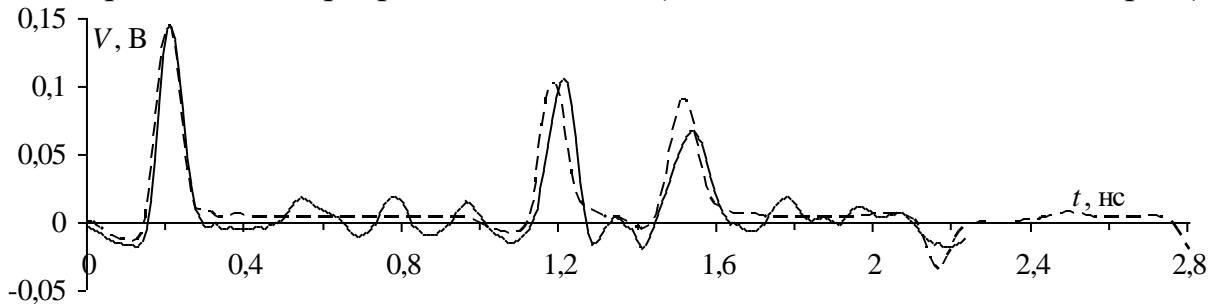


Рисунок 3.5 – Формы напряжения на выходе витка МЛ с лицевой связью при $l=100$ мм по результатам моделирования (---) и измерений (—)

Хорошая согласованность результатов моделирования и измерений подтверждает разложение импульса на составляющие в витке МЛ с лицевой связью.

Таким образом, модальное разложение импульсного воздействия в витке меандровой линии с выравниванием амплитуд его доминирующих составляющих ослабляет воздействие в 1,6–6,3 раза.

Кроме того, оценено увеличение длительности воздействия, разлагаемого полностью (получены условия этого), а также исследовано разложение: затухающей синусоиды, электростатического разряда и реальных СШП генераторов.

В разделе 3.4 рассмотрены полосковые устройства, улучшающие разложение импульсного воздействия в витке МЛ на составляющие. Предложено ис-

пользовать отражения в витке из двух отрезков для увеличения ослабления. Исследовано влияние дополнительных проводников на ослабление. Рассмотрены многокаскадные и гибридные устройства.

4. Разработка моделей и алгоритмов для анализа устройств на основе связанных полосковых линий

В разделе 4.1 алгоритмически ускорено вычисление матрицы погонных коэффициентов электростатической индукции (далее ёмкостной матрицы \underline{C}) при многовариантном квазистатическом анализе. Он требует m раз применить алгоритм вычисления \underline{C} (где m – количество точек изменения параметров) к анализируемой структуре, основным этапом которого является решение матричного уравнения для решения N_{COND} СЛАУ

$$\mathbf{S}_k \mathbf{\Sigma}_k = \mathbf{V}_k, \quad (4.1)$$

где \mathbf{V}_k – неизменная в ходе вычислений матрица размера $N \times N_{COND}$, состоящая из задаваемых потенциалов на подобластях, на которые разбиты границы структуры, а $\mathbf{\Sigma}_k$ – искомая матрица размера $N \times N_{COND}$, дающая распределение плотности заряда на этих границах, N_{COND} – количество проводников в структуре.

Изменение параметров структуры изменяет матрицу СЛАУ, требуя её решения m раз с затратами времени на многовариантный анализ пропорциональными m . Между тем изменение некоторых параметров структуры (рисунок 4.1а) приводит к частичному изменению матрицы СЛАУ (рисунок 4.1б, в). Один из них – ϵ_r , изменяющий лишь элементы на главной диагонали с индексами больше N_A , а другой – h_C , изменяющий элементы в нижней и правой частях матрицы.

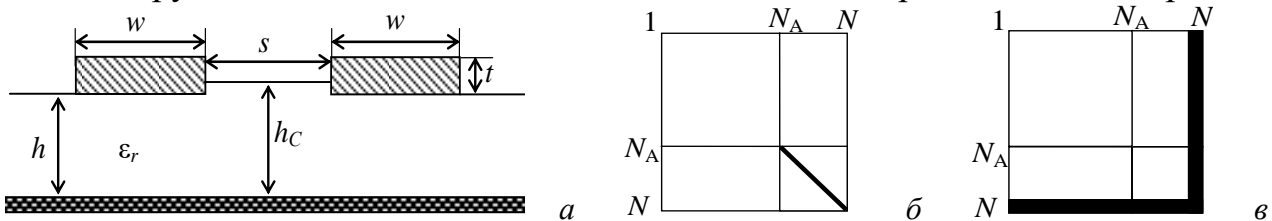


Рисунок 4.1 – Поперечное сечение МПЛ (а) и вид матрицы при изменении ϵ_r (б) и h_C (в)

Таким образом, при m -кратном вычислении матрицы \underline{C} с изменяющимися ϵ_r и h_C нет необходимости в полном пересчёте элементов матрицы СЛАУ, а главное – в полном повторном её решении. Вместо этого нужен пересчёт лишь элементов изменившейся части матрицы, а ускоренное решение с учётом такой специфики даёт блочное LU-разложение. С его помощью усовершенствованы алгоритмы вычисления m матриц \underline{C} при изменении ϵ_r и h_C . Оценено ускорение при изменении ϵ_r (таблица 4.1), на 2 рабочих станциях (РС) с вычислением на одном ядре при $N_A/N=0,9$, $m=100, 200, \dots, 1000$ и $N_{COND}=1$ и 10.

Таблица 4.1 – Оценки ускорения решения m СЛАУ усовершенствованным алгоритмом

N_{COND}	РС	m									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	1	5,98	11,97	16,93	22,09	27,07	31,53	35,56	38,72	42,1	44,56
	2	7,13	1401	20,09	26,2	30,91	32,33	31,97	36,58	39,21	41,12
10	1	5,94	11,86	16,33	21,46	25,93	29,39	32,75	33,91	38,03	42,10
	2	7,4	14,47	18,07	24,15	29,96	34,74	37,3	42,89	45,65	46,84

Из таблицы 4.1 виден рост ускорения с ростом m , до 46,84 раза.

Затем оценено ускорение вычисления матрицы \underline{C} с учётом частотой зависимости комплексной ε_r . Для однократного вычисления алгоритм оказался неэффективным. Оценки для многократных вычислений при $N_A/N=0,9$, $N=165$, 1650 и $m=2^k$, где $k=10, 11, \dots, 15$ сведены в таблицу 4.2. Видно, что время вычислений возрастает линейно с ростом m , а ускорение слабо зависит от него, но возрастает с 2,7 до 8,8 при увеличении N от 165 до 1650. Таким образом, выявлено ускорение многократного вычисления ёмкостной матрицы с учётом зависимости $\varepsilon_r(f)$ до 8,8 раза.

Таблица 4.2 – Время и ускорение 2^k вычислений ёмкостной матрицы при $N=165$ и $N=1650$

k	$N=165$			$N=1650$		
	$T_{И}, c$	$T_{У}, c$	$T_{И}/T_{У}$	$T_{И}, c$	$T_{У}, c$	$T_{И}/T_{У}$
10	13,4	5,0	2,69	1853,4	209,6	8,86
11	27,1	10,0	2,71	3707,8	418	8,87
12	53,7	19,8	2,71	7415,2	835,7	8,87
13	107,1	38,8	2,76	14835	1672,1	8,87
14	213,8	81,1	2,63	29600	3353,9	8,82
15	428,9	161,8	2,65	59230	6701,1	8,84

Наконец, оценено ускорение вычисления временного отклика пары связанных линий (рисунок 4.1а) с учётом $\varepsilon_r(f)$ и $\operatorname{tg}\delta(f)$. Воздействовал импульс в виде трапеции с $t_r=t_f=100$ пс и $t_d=10$ пс при $m=2^{16}$. Для оценки ускорения вычислены отклики с длинами подынтервала (l) на границах диэлектрик-диэлектрик от 5 мкм до 640 мкм, что даёт рост N_A/N (рисунок 4.2). Видно, что увеличение l вносит ошибку при вычислении матрицы \underline{C} , что влияет на отклик: он сдвигается влево. При увеличении l : задержка уменьшилась на 4,22% для первого импульса и 3,21% – второго; амплитуда увеличилась на 4,35% для первого и на 2,94% – второго; разность задержек увеличилась на 8,11 %.

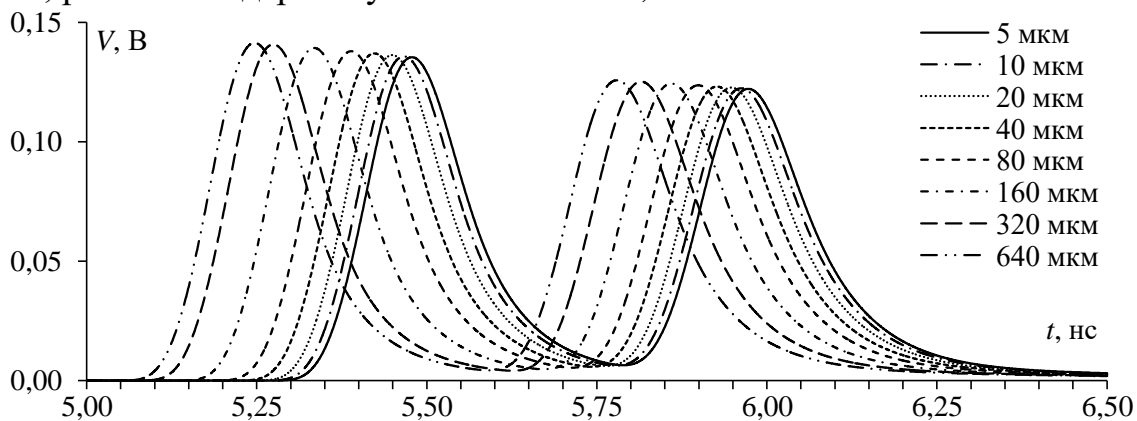


Рисунок 4.2 – Отклики в конце активного проводника пары связанных линий с разным l

Таким образом, даже грубая сегментация, но лишь на границах диэлектрик-диэлектрик, может давать приемлемую точность результатов. Это позволяет минимизировать N за счет уменьшения числа подынтервалов на границах диэлектрик-диэлектрик ($N_A/N \rightarrow 1$). Оценки времени и ускорения вычисления отклика выполнены на одном и всех ядрах РС (таблица 4.3). Видно, что загромождение сегментации уменьшило время вычислений: при использовании одного ядра РС в 6 раз для исходного алгоритма, и в 5 раз – для усовершенствованного, а всех ядер – в 4,5 и 4 раза соответственно. Ускорение уменьшилось с 2,15 до

1,66 раза при использовании одного ядра и с 1,68 до 1,48 раза – всех. Дальнейшее увеличение l после 20 мкм нецелесообразно, так как ускорение уменьшается, а ошибка – существенно возрастает. Малое ускорение объяснимо сложением затрат на многократное вычисление ёмкостной матрицы и вычисление отклика, операции ускорения которого не применялись. Другим фактором является малый порядок матриц СЛАУ. То, что исследование выполнено лишь на примере отклика отрезка пары связанных линий (только с одним диэлектриком) не означает, что разработанный алгоритм неприменим к более сложным структурам.

Таблица 4.3 – Зависимости времени и ускорения вычисления отклика для одного и всех ядер РС от длины подынтервала l

l , мкм	N_A	N	N_A/N	Одно ядро			Все ядра		
				$T_{и}$, с	$T_{у}$, с	$T_{и}/T_{у}$	$T_{и}$, с	$T_{у}$, с	$T_{и}/T_{у}$
5	288	708	0,40	9825	4587	2,15	6565	3913	1,68
10	288	498	0,58	4341	2012	2,16	3215	1897	1,69
20	288	393	0,75	2668	1312	2,03	2174	1297	1,67
40	288	339	0,85	2057	1088	1,89	1757	1093	1,61
80	288	314	0,92	1820	1024	1,77	1601	1021	1,56
160	288	302	0,95	1722	995	1,73	1513	991	1,52
320	288	295	0,98	1654	976	1,69	1466	976	1,50
640	288	291	0,99	1610	969	1,66	1436	966	1,48

Таким образом, можно ускорить расчёт временного отклика до 2,15 раза.

В разделе 4.2 получен ряд аналитических моделей временного отклика для анализа полосковых устройств с модальным разложением. Сначала модели в замкнутой форме получены для витка МЛ с симметричным поперечным сечением и окончаниями. Его схема показана на рисунке 4.3а, где Y_0 представляет проводимость, обратную сопротивлению генератора и нагрузки или их характеристический адмиттанс. Из раздела 3.3 известно, что отклик на выходе витка представлен последовательностью составляющих. Поэтому получены выражения для них в аналитическом виде по моделям для отрезка симметричной связанной линии, полученным на основе моделей для одиночной линии с адмиттансом Y_1 и задержкой τ_1 (рисунок 4.3б).

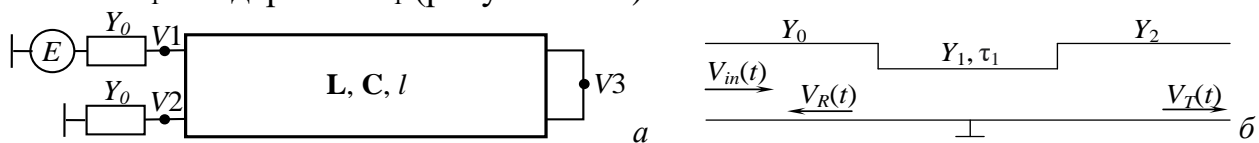


Рисунок 4.3 – Схема соединений витка (а) и эквивалентная схема отрезка линии передачи (б)

Сначала получены компоненты отклика для дальнего (учитывающие проходящую волну) и ближнего (учитывающие отражение от начала и конца отрезка линии) концов. Затем, при заданном чётном или нечётном числе отражений (k_{ref}), получены выражения для откликов на дальнем (с учетом компонент, испытавших четное число отражений) или ближнем (с учетом компонент, испытавших нечетное число отражений) концах витка:

$$V_T(t) = V_0(t) + \sum_{k=1}^{k_{ref}/2} V_{outK}(t), \quad V_R(t) = V_1'(t) + V_1''(t) + \sum_{k=1}^{(k_{ref}-1)/2} V_{refK}(t), \quad (4.2)$$

где $V_0(t)$ – проходящая волна, $V_1'(t)$ и $V_1''(t)$ – отражения от начала и конца отрезка соответственно, а

$$V_{outK}(t) = \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} \frac{2Y_1}{Y_1 + Y_2} V_{in}(t - (2k + 1)\tau_1) \prod_{i=1}^k \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} \frac{Y_1 - Y_0}{Y_1 + Y_0},$$

$$V_{refK}(t) = \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} \frac{2Y_1}{Y_0 + Y_1} \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} V_{in}(t - 2(k + 1)\tau_1) \prod_{i=1}^k \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} \frac{Y_1 - Y_0}{Y_1 + Y_0}.$$

Выражения (4.2) для одиночной линии применимы для симметричной (в поперечном сечении и по нагрузкам) связанной линии, если их записать отдельно, заменив у Y_1 и τ_1 индекс «1» на индексы «e» и «o» для чётной и нечётной мод соответственно. Тогда при напряжении в начале активного проводника $V_{in}(t)$, равном половине воздействующей э.д.с., из компонент отклика для каждой моды получаются отклики на каждом из концов линии. Структура на рисунке 4.3a является связанной линией с проводниками закороченными между собой на дальнем конце. Поэтому на дальнем конце (на рисунке 4.3б и в (4.2)) $Y_2 = \infty$ для нечётной моды и $Y_2 = 0$ – для чётной. Тогда (4.2) для каждой моды упрощается. Для отклика на выходе витка (в узле V2) получено (модели для узлов V1 и V3 не приведены с целью экономии места)

$$V2(t) = \frac{V_{in}}{2} t \left(\frac{Y_0 - Y_e}{Y_0 + Y_e} - \frac{Y_0 - Y_o}{Y_0 + Y_o} \right) + 2Y_0 \left(\frac{Y_e V_{in}(t - 2l\tau_e)}{(Y_0 + Y_e)^2} + \frac{Y_o V_{in}(t - 2l\tau_o)}{(Y_0 + Y_o)^2} \right) +$$

$$+ 2Y_e Y_0 \sum_{i=2}^{k_{ref}} (-1)^{i+1} V_{in}(t - 2l\tau_e i) (Y_e + Y_0)^{-(1+i)} (Y_0 - Y_e)^{i-1} +$$

$$+ 2Y_o Y_0 \sum_{i=2}^{k_{ref}} V_{in}(t - 2l\tau_o i) (Y_o + Y_0)^{-(1+i)} (Y_0 - Y_o)^{i-1}. \quad (4.3)$$

Модель (4.3) отличается от алгоритмических моделей использованием простых выражений в замкнутой форме. Их достоинства (по сравнению с анализом численными методами) – точность (за счет аналитики) и меньшие вычислительные затраты (в т.ч. за счет учёта заданного числа отражений).

Для структур с произвольными поперечным сечением и окончаниями описанный подход не применим. Поэтому для получения моделей отклика использован подход (Park S.W., Xiao F., Kami Y.) к вычислению перекрестных помех в многопроводных линиях передачи. Согласно подходу нужно задать форму напряжения воздействия через вектор \mathbf{V} и параметры окончаний отрезка (матрицы \mathbf{R}_S и \mathbf{R}_L). Затем на основе матриц погонных коэффициентов электромагнитной (\mathbf{L}) и электростатической (\mathbf{C}) индукции отрезка определить матрицы преобразования \mathbf{T}_V и \mathbf{T}_I . Они нужны для перехода к вектору модальных источников напряжения \mathbf{v}_m и матрицам модальных импедансов \mathbf{R}_{Sm} и \mathbf{R}_{Lm} и последующего нахождения вектора источников изначально падающих мод \mathbf{v}_{0m} и матриц коэффициентов отражения на ближнем ($\mathbf{\Gamma}_S$) и дальнем ($\mathbf{\Gamma}_L$) концах. Тогда отклик в любой точке отрезка определяет комбинация компонент изначально падающих мод и коэффициентов отражения, соответствующих неоднородностям на стыках отрезка и окончаний. Рассмотрим модели распространения изначально падающих мод на примере двухпроводного МФ и витка МЛ с произвольными поперечным сечением и окончаниями (рисунок 4.4, где V_{0c} , V_{0d} – векторы источников синфазной и дифференциальной падающих мод; T_c , T_d – задержки

их распространения; Z_c, Z_d – их характеристические импедансы; $\Gamma_{Scs}, \Gamma_{Scd}, \Gamma_{Sdc}, \Gamma_{Sdd}, \Gamma_{Lcc}, \Gamma_{Lcd}, \Gamma_{Ldc}, \Gamma_{Ldd}$ – коэффициенты матриц отражения Γ_S и Γ_L .

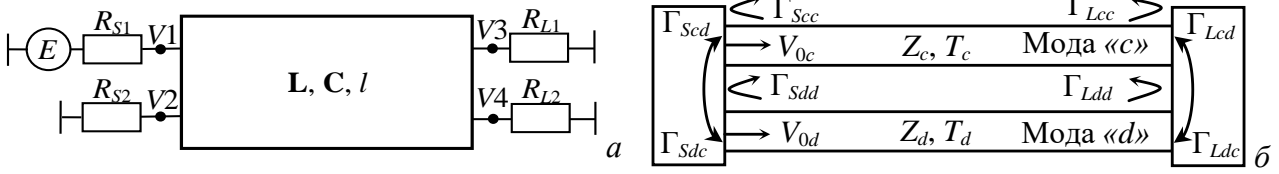


Рисунок 4.4 – Схемы соединений (а) и распространения мод (б) в двухпроводном МФ

Согласно схеме рисунка 4.4б получены компоненты отклика для синфазной и дифференциальной мод на ближнем конце:

$$V_c(0, t) = V_{0c}(t) + \Gamma_{Lcc}(1 + \Gamma_{Scs})V_{0c}(t - 2T_c) + \Gamma_{Scd}\Gamma_{Ldd}V_{0d}(t - 2T_d) + \Gamma_{Ldc}\Gamma_{Scd}V_{0c}(t - (T_c + T_d)) + \Gamma_{Lcd}(1 + \Gamma_{Scs})V_{0d}(t - (T_c + T_d)), \quad (4.4)$$

$$V_d(0, t) = V_{0d}(t) + \Gamma_{Ldd}(1 + \Gamma_{Sdd})V_{0d}(t - 2T_d) + \Gamma_{Lcc}\Gamma_{Sdc}V_{0c}(t - 2T_c) + \Gamma_{Lcd}\Gamma_{Sdc}V_{0d}(t - (T_c + T_d)) + \Gamma_{Ldc}(1 + \Gamma_{Sdd})V_{0c}(t - (T_c + T_d)), \quad (4.5)$$

На основе (4.4) и (4.5) получены модели отклика в узлах схемы на рисунке 4.4а. Модель отклика на конце активного проводника (узел V3) имеет вид

$$\begin{aligned} V3(l, t) &= T_{Vc,1}V_c(l, t) + T_{Vd,1}V_d(l, t) = \\ &= T_{Vc,1} \left[(1 + \Gamma_{Lcc})V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{Lcd}V_{0d}(t - T_d) \right] + \\ &+ T_{Vd,1} \left[(1 + \Gamma_{Ldd})V_{0d}(t - T_d) + \Gamma_{Ldc}V_{0c}(t - T_c) \right], \end{aligned} \quad (4.6)$$

где $T_{Vc,2}, T_{Vd,2}$ – коэффициенты матрицы преобразования мод.

Также на основе (4.4) и (4.5) и с учётом перемычки в конце витка вместо R_{L1} и R_{L2} ($\Gamma_{Lcc}=1, \Gamma_{Ldd}=-1$) получена модель отклика на выходе витка МЛ (узел V2)

$$\begin{aligned} V2(0, t) &= T_{Vc,2}V_c(0, t) + T_{Vd,2}V_d(0, t) = \\ &= T_{Vc,2} \left(\begin{aligned} &V_{0c}(t) + (1 + \Gamma_{Scs})V_{0c}(t - 2T_c) - \Gamma_{Scd}V_{0d}(t - 2T_d) + \\ &+ \Gamma_{Ldc}\Gamma_{Scd}V_{0c}(t - (T_c + T_d)) + \Gamma_{Lcd}(1 + \Gamma_{Scs})V_{0d}(t - (T_c + T_d)) \end{aligned} \right) + \\ &+ T_{Vd,2} \left(\begin{aligned} &V_{0d}(t) - (1 + \Gamma_{Sdd})V_{0d}(t - 2T_d) + \Gamma_{Sdc}V_{0c}(t - 2T_c) + \\ &+ \Gamma_{Lcd}\Gamma_{Sdc}V_{0d}(t - (T_c + T_d)) + \Gamma_{Ldc}(1 + \Gamma_{Sdd})V_{0c}(t - (T_c + T_d)) \end{aligned} \right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Таким образом, получены аналитические модели временного отклика витка МЛ и двухпроводного МФ с произвольными поперечными сечениями для вычисления формы выходного напряжения при произвольных окончаниях и воздействии произвольной формы. Их ограничением, в отличие от (4.3), является то, что они учитывают лишь одно отражение.

На основе описанного подхода также получены модели временного отклика витка МЛ из двух отрезков с симметричными поперечным сечением и окончаниями и трёхпроводного МФ с произвольными поперечным сечением и окончаниями. Из соображений экономии места, они не приведены.

В разделе 4.3 получены универсальные условия разложения импульсного воздействия в многокаскадных устройствах на основе витка МЛ с симметричным и асимметричным поперечными сечениями, что упрощает анализ и синтез.

В разделе 4.4 кратко описаны разработанные программные модули для анализа полосковых устройств с модальным разложением: для аналитического вычисления временного отклика устройств (на основе моделей раздела 4.2) и отклика многокаскадных устройств (на основе условий раздела 4.3).

5. Создание методик оптимизации и проектирования устройств на основе связанных полосковых линий

В разделе 5.1 описаны предпосылки создания методики оптимизации полосковых устройств с модальным разложением. Представлен подход к оптимизации и комплекс предшествующих исследований, недостатком которых является то, что сходимость по амплитудному критерию (минимальная амплитуда выходного напряжения) определяется по временному отклику, вычисление которого требует существенных затрат времени, которые сопоставимы с затратами на вычисление матриц погонных параметров устройств и могут быть даже выше. Условием минимизации амплитуды является равенство амплитуд доминирующих составляющих отклика. Их легко получить на основе моделей, разработанных в разделе 4.2, и использовать в качестве критериев при оптимизации.

Из (4.3) получены условия равенства амплитуд составляющих отклика на выходе витка с симметричным поперечным сечением и равными резистивными окончаниями для ряда частных случаев. Для этого определены нормированные к $V_{in}(t)$ амплитуды каждой его составляющей. Сначала выравнены амплитуды перекрестной помехи (V_c) и суммы импульсов чётной (V_e) и нечётной (V_o) мод (когда их погонные задержки равны). За счёт коэффициента электромагнитной связи $k=(x^2-1)/(x^2+1)\approx 0,89$ (где $x=(Y_o/Y_e)^{0,5}$), обеспечивающего нормированную амплитуду 0,618. Затем выравнены амплитуды трёх составляющих ($V_c=V_e=V_o$) при $k=0,707$ и их нормированных амплитудах 0,414. Наконец, рассмотрен одновременного приход импульса поздней моды и отраженного от начала витка импульса ранней моды обратной полярности, давший нормированную амплитуду 0,309 при $k=0,618$ и условия $Y_o=Y_e$. Таким образом, получены условия равенства нормированных амплитуд на выходе витка МЛ для трёх случаев, что в совокупности с моделями раздела 4.2 ускоренное проектирование и параметрическую оптимизацию витка МЛ, поскольку не требует вычисления временного отклика.

Для витка МЛ с произвольными поперечным сечением и резистивными окончаниями также получены модели нормированных амплитуд составляющих отклика на выходе за счёт выделения его компонент из моделей, распространяющихся с одинаковой задержкой. Но из-за громоздкости, они не приведены.

Из (4.6) получено условие равенства амплитуд составляющих на выходе 2-проводного МФ при произвольных окончаниях

$$\frac{Z_c (T_{Id,2} R_{S2} + T_{Vd,2} Z_d)}{Z_d (T_{Ic,2} R_{S2} + T_{Vc,2} Z_c)} = - \frac{(\eta_I T_{Vd,1} R_{L2} + \eta_V T_{Id,1} Z_c)}{(\eta_I T_{Vc,1} R_{L2} + \eta_V T_{Ic,1} Z_d)}, \quad (4.8)$$

где нет сопротивлений на концах активного проводника (R_{S1} и R_{L1}), а есть лишь сопротивления на концах пассивного проводника (R_{S2} и R_{L2}). Поэтому, когда заданы параметры поперечного сечения (известны матрицы \mathbf{T}_I и \mathbf{T}_V и импедансы мод Z_c и Z_d), это условие обеспечивается выбором R_{S2} и R_{L2} , но возможно и об-

ратное – выбор параметров витка при заданных R_{S2} и R_{L2} . Таким образом, равенство амплитуд доминирующих составляющих временного отклика на выходе асимметричного 2-проводного МФ, без учёта потерь и дисперсии, не зависит от сопротивлений на концах его активного проводника и достигается подбором сопротивлений на концах пассивного проводника.

Затем из (4.6) получены условия для частных случаев выбора окончаний 2-проводного МФ: их равенства ($R_{S1}=R_{S2}=R_{L1}=R_{L2}=R$); соединения пассивного проводника на одном или обоих концах с опорным ($R_{S2}=0$; $R_{L2}=0$; $R_{S2}=R_{L2}=0$). Также получены нормированные амплитуды доминирующих составляющих и условия их равенства на выходе витка МЛ с произвольным поперечным сечением, а также условие равенства нормированных амплитуд основных и отраженных составляющих мод на выходе витка МЛ из двух отрезков (рисунок 5.1) и получено условие (4.9) (где Z_e и Z_o – импеданс чётной и нечетной мод).

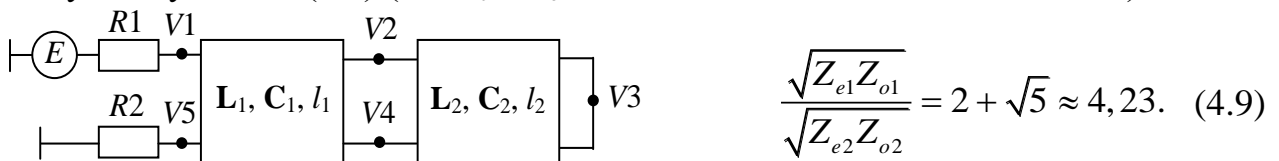


Рисунок 5.1 – Схема витка МЛ из двух отрезков

Наконец, получено условие равенства амплитуд составляющих отклика на выходе трёхпроводного МФ на основе МПЛ с двумя заземленными симметричными крайними проводниками (рисунок 5.1). Симметрия приводит к нулю часть элементов матриц отражения и преобразования моды и амплитуды третьей составляющей отклика (моды «с»). В итоге получено:

$$\frac{Z_a}{Z_b} = -\frac{T_{Ia,1}\eta_1}{T_{Ia,2}\eta_2}, \quad (4.10)$$

где $\eta_1 = (T_{Vb,2}T_{Vc,3} - T_{Vb,3}T_{Vc,2})$, $\eta_2 = (T_{Vb,1}T_{Vc,3} - T_{Vc,1}T_{Vb,3})$, а Z_a и Z_b – волновые сопротивления мод «а» и «b». В (4.10) нет R_S и R_L , а значит, от них не зависит равенство амплитуд мод. Таким образом, выравнивание амплитуд доминирующих составляющих разложения импульсного воздействия в ряде меандровых линий и модальных фильтров, без учёта потерь и дисперсии, не требует вычисления временного отклика.

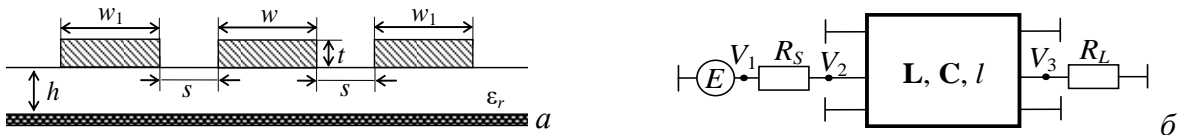


Рисунок 5.2 – Поперечное сечение (а) и схема соединения (б) трёхпроводного МФ на основе МПЛ с двумя заземленными крайними проводниками

Предложена методика оптимизации полосковых устройств на основе связанных линий с модальным разложением, отличающаяся использованием, в качестве критериев, условий равенства амплитуд составляющих временного отклика на выходе устройства, что исключает вычисления отклика при оптимизации. Она состоит из следующих шагов:

1. Создание модели поперечного сечения полоскового устройства.
2. Проверка корректности модели за счёт многовариантного моделирования и оценки сходимости его результатов с контрольными значениями.

3. Выбор критерия оптимальности устройства и формулировка целевой функции. Здесь в качестве критериев используются полученные условия.

4. Определение диапазонов поиска параметров поперечного сечения.

5. Выбор метода и настройка параметров оптимизации.

6. Запуск процесса оптимизации.

7. Анализ результатов оптимизации: при необходимости, построение графиков зависимости целевой функции от параметров алгоритма оптимизации для проверки сходимости; статистический анализ чувствительности найденного оптимального решения к отклонениям реальных параметров от расчетных.

Выполнена апробация методики. Взяты 3 структуры: виток с симметричным поперечным сечением в неоднородном диэлектрике, асимметричный 2-проводный МФ с произвольным поперечным сечением и 3-проводный МФ на основе МПЛ с двумя симметричными заземленными крайними проводниками. При проектировании полосковых устройств часто параметры основы известны, поэтому варьировались ширина проводников (w) и расстояние между ними (s) в диапазоне от 50 до 1000 мкм. Толщина подложки $h=720$ мкм, фольги $t=18$ мкм, $\epsilon_r=8$, длина всех устройств $l=300$ мм, а окончания – $R=50$ Ом. Оптимизация выполнена тремя методами: методом роя частиц (МРЧ), генетическим алгоритмом (ГА) и эволюционными стратегиями (ЭС). Параметры методов подобраны так, что количество вычислений составило $n=100, 1000, 5000, 10000$. Для оценки ускорения выполнены два варианта оптимизации. Первый – с минимизацией целевой функции $F=\max|V(t)|$. Оценка сходимости выполнена по временному отклику (т.е. минимизировался модуль максимального элемента вектора напряжений). Для второго минимизировался модуль разности правой и левой частей условий $k=0,707$ и (4.8), (4.10) соответственно. Отклик вычислялся в частотной области для $m=2^k$ частотных точек. Поскольку от m зависит корректность результатов и количество учитываемых отражений, то оптимизация выполнена при $k=12, 14, 16, 18$, причём на трёх РС. Для примера в таблице 5.1 приведены результаты 2-проводного МФ с применением ГА на РС 1.

Таблица 5.1 – Время (с) и ускорение параметрической оптимизации 2-проводного МФ с помощью ГА для наиболее производительной РС

Метод	n	T_R				T_A	T_R/T_A			
		$k=12$	$k=14$	$k=16$	$k=18$		$k=12$	$k=14$	$k=16$	$k=18$
ГА	100	3,8	13,3	53,2	203,1	1,0	3,8	13,3	53,3	203,5
	1000	33,5	121,6	459,7	1856,4	6,7	5,0	18,3	69,0	278,8
	5000	165,8	643,0	2266,4	9713,5	32,0	5,2	20,1	70,8	303,4
	10000	363,1	1260,2	4636,2	18500,4	65,1	5,6	19,3	71,2	284,0

Из таблицы 5.1 видно, что зависимости T_R и T_A от n и k практически линейны, наибольшее ускорение (303,4 раза) получено при $n=5000$ и $k=18$. Выявлено, что ГА не даёт существенного выигрыша в ускорении по сравнению с ЭС и МРЧ. Средние ускорения составили: 279 для РС 1, 203 раза – РС 2 и 194 раза – РС 3. Таким образом, использование условий равенства нормированных амплитуд доминирующих составляющих временного отклика на выходе полосковых устройств с модальным разложением уменьшает время параметрической оптимизации исследованных устройств эволюционными алгоритмами до 300 раз.

В разделе 5.2 сначала оптимизирован виток МЛ с симметричным поперечным сечением для его проектирования на заданной площади S . Виток трассирован в виде меандра со слабой связью между неосновными полувитками, а для дополнительного уменьшения площади добавлены заземленные проводники.

Затем сформулирована методика проектирования помехозащитных полосковых устройств с модальным разложением, отличающаяся применением предложенной методики параметрической оптимизации, аналитического расчёта формы выходного напряжения по моделям в замкнутом виде и предложенных МЭК N -норм для оценки эффективности ослабления помехи. Методика состоит из следующих шагов:

1. Задание параметров материала основы печатной платы, сопротивлений на концах активных и пассивных (при наличии) проводников устройства, формы э.д.с. $E(t)$ воздействия и свободной площади S на печатной плате.

2. Параметрическая оптимизация поперечного сечения устройства по методике из раздела 5.1 по критерию обеспечения одного из условий равенства амплитуд составляющих отклика на выходе устройства. Результат – оптимальные значения параметров полоскового устройства. По существу, при оптимизации минимизируется норма N_1 на выходе полоскового устройства, которая характеризует амплитуду сигнала.

3. Аналитический расчёт временного отклика устройства по соответствующей модели из раздела 4.2. Результат – форма выходного напряжения, позволяющая оценку соответствия параметров устройства цели оптимизации.

4. Оптимизация структуры (количества и длины неосновных витков и расстояния между ними) полоскового устройства, свернутого в меандр со слабой связью, для размещения на заданной площади платы S . Результат – модель полоскового устройства с оптимальными параметрами.

5. Численное моделирование формы напряжения на выходе оптимизированного полоскового устройства с учётом потерь квазистатическим и/или электродинамическим подходом и оценка N -норм. Результат – оценка согласованности результатов грубого аналитического расчёта с результатами численного моделирования отклика и уменьшения нормы N_1 .

6. Повторное выполнение п. 3–5 (при необходимости) по критерию минимизации одной из норм N_2 – N_5 для заданного воздействия.

Методика апробирована на двух моделях витка МЛ с асимметричным поперечным сечением, модели витка МЛ из двух отрезков и модели 3-проводного МФ на основе МПЛ с двумя симметричными заземленными крайними проводниками. Из соображений экономии места результаты моделирования не приведены, но измеренные характеристики разработанных с применением методики прототипов представлены ниже. Ограничением методики является невозможность синтеза многокаскадных устройств, поскольку трудно получить условия равенства амплитуд составляющих для них в аналитическом виде.

6. Экспериментальное подтверждение методики проектирования

Предложенная в разделе 5.2 методика проектирования экспериментально апробирована. В разделе 6.1 представлены результаты измерения характеристик

разных прототипов витка МЛ. Сначала – витка с симметричным поперечным сечением, с доказательством возможности его размещения на заданной площади платы (с сохранением ослабления) за счёт его сворачивания в меандр со слабой связью между полувитками. Затем доказана применимость дополнительных заземленных проводников для уменьшения занимаемой площади. Также выполнены измерения в uTEM-камере для оценки излучаемых помехоэмиссий.

Измерен симметричный виток МЛ из двух отрезков (рисунок 6.1) во временной и частотной областях. Для прототипа взят FR-4 с $h=0,51$ мм, $t=35$ мкм, $\epsilon_r=4,59$ и $\text{tg}\delta=0,022$ при $f=1$ ГГц. Оптимальные параметры отрезков: $s_1=0,2$ мм, $w_1=0,8$ мм, $s_2=0,2$ мм, $w_2=3,25$ мм. Виток размещен на площади $S=80\times 80$ мм².

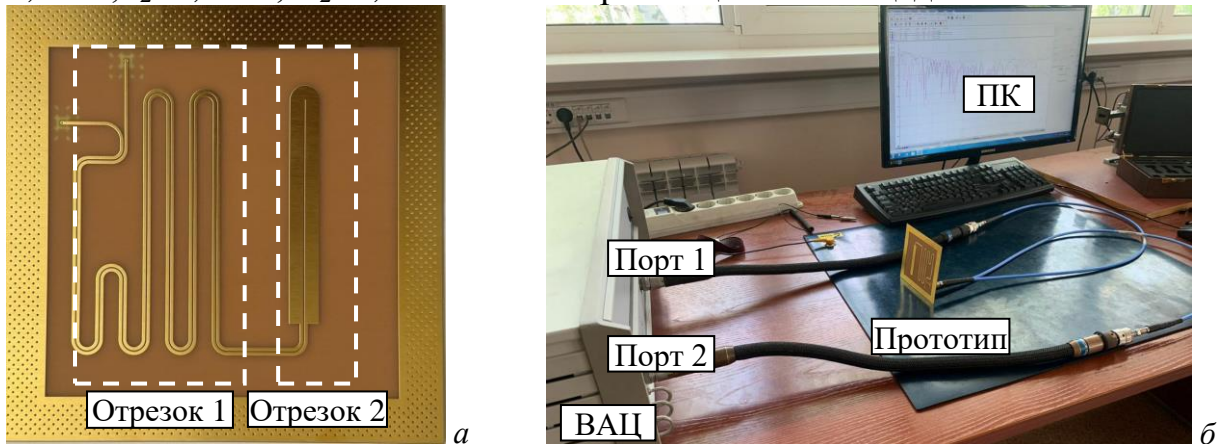


Рисунок 6.1 – Прототип витка МЛ из двух отрезков (а) и измерение S -параметров (б)

Измерены частотные зависимости S -параметров прототипа (рисунок 6.2). Полоса пропускания по уровню минус 3 дБ составила 160 МГц.

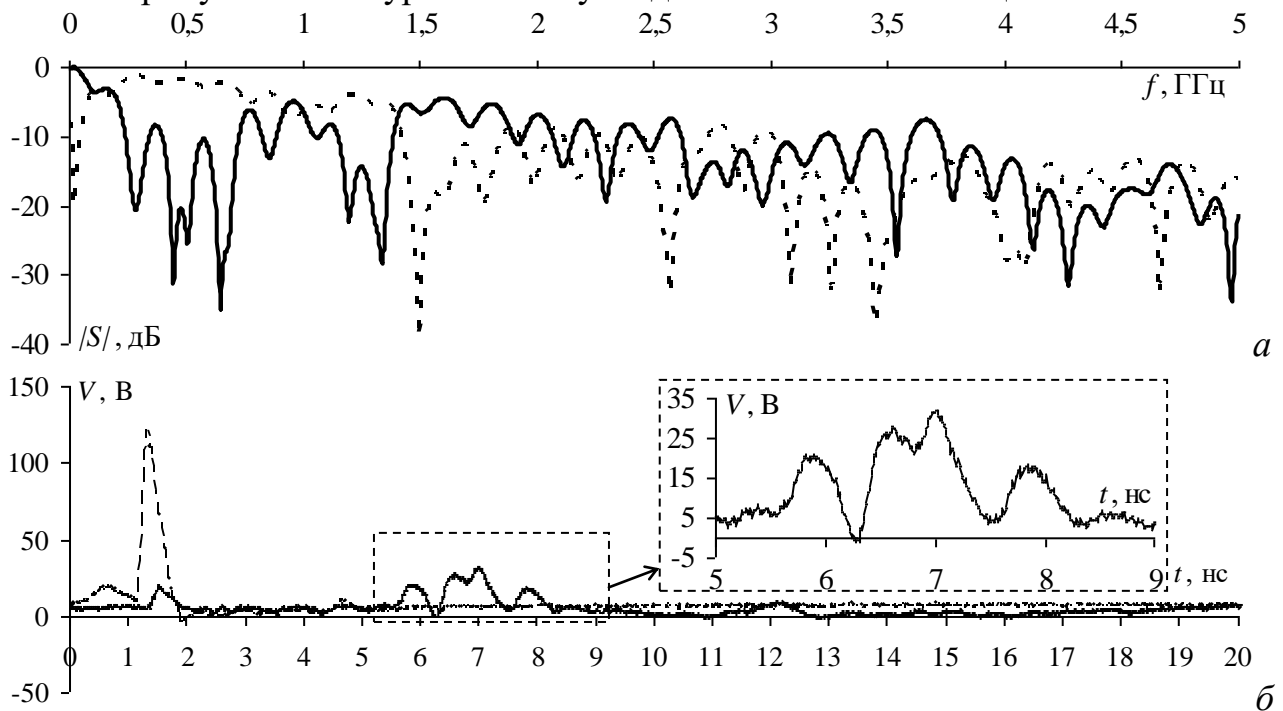


Рисунок 6.2 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (- -) и $|S_{21}|$ (—) (а) и формы напряжения на входе (- -) и выходе (—) (б) прототипа

Измерения во временной области были на базе генератора Fid Technology ГИН-1-1 и осциллографа АК ИП-4132. На рисунке 6.2б показаны формы напря-

жения на входе и выходе прототипа. Воздействовал треугольный импульс с амплитудой 120 В и длительностью 500 пс по уровню 0,5. Для оценки ослабления вычислены N -нормы (таблица 6.1). Видно, что все нормы снизились, а сильнее всех N_1 (3,75 раза) и N_2 (3,98 раза). Также оценены излучаемые помехоэмиссии.

Таблица 6.1 – N -нормы на входе и выходе прототипа витка из двух отрезков

Источник данных	N_1	$N_2 \times 10^{-12}$	$N_3 \times 10^7$	$N_4 \times 10^7$	$N_5 \times 10^3$
Вход прототипа	120,65	1,6825	1,540	1,550	1,977
Выход прототипа	32,210	0,4228	1,092	1,100	1,104

Затем представлены результаты для асимметричного поперечного сечения на основе МПЛ (рисунок 6.3). Для подложки взят Arlon AD1000 с $h=0,508$ мм, $t=18$ мкм и $\epsilon_r=10,2$. После оптимизации получены 2 набора параметров. Набор 1: $w_1=0,5$ мм, $w_2=1$ мм, $s=0,6$ мм, $l=1209$ мм. Для набора 2 w_2 увеличена до 1 мм, а $l=749,5$ мм. Площадь на плате – $S=80 \times 80$ мм². Сначала измерены S -параметры прототипов. Они имеют узкую полосу пропускания (36 и 12,8 МГц для прототипов 1 и 2 соответственно). Затем на основе измеренных и вычисленных S -параметров получены отклики на импульс длительностью 900 пс. Видно, что формы напряжения, полученные разными методами, согласуются. Для оценки эффективности прототипов оценены N -нормы (таблица 6.2).

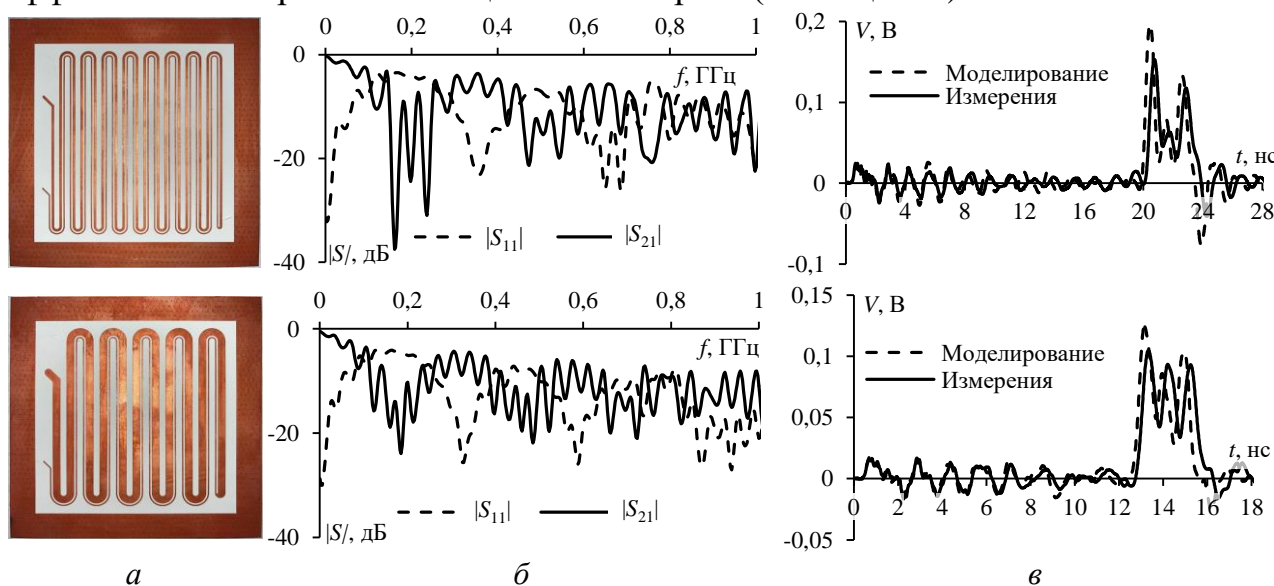


Рисунок 6.3 – Вид прототипов 1 (сверху) и 2 (снизу) (а), частотные зависимости S -параметров (б) и соответствующие им формы выходного напряжения (в)

Таблица 6.2 – N -нормы при воздействии импульсом в виде трапеции для прототипов 1 и 2

Источник	N_1	$N_2 \times 10^{-9}$	$N_3 \times 10^{10}$	$N_4 \times 10^{10}$	$N_5 \times 10^6$
Входное воздействие	0,5	1,83	3,0	3,0	11,2
Прототип 1. Моделирование	0,196	0,556	3,018	5,662	6,106
Прототип 1. Измерения	0,153	0,396	2,803	4,810	5,106
Прототип 2. Моделирование	0,125	0,34	2,668	4,081	4,338
Прототип 2. Измерения	0,105	0,276	2,668	3,925	4,108

Из таблицы 6.2 Видно, что нормы, вычисленные на основе результатов, полученных разными методами, согласуются. Наибольшее уменьшение N_1 (до 5 раз) получено для прототипа 2 из-за меньшего за счёт роста амплитуды дополнительного импульса из-за асимметрии. Заметно уменьшение N_2 (до 6,6 раз) и

N_5 , но существенного уменьшения N_3 не выявлено, а N_4 может быть даже больше, чем у воздействия за счёт сглаживания отклика из-за потерь. Также оценены излучаемые помехоэмиссии и целостность цифрового сигнала. Аналогичные измерения выполнены для прототипа лицевой связью, но они не приведены.

В разделе 6.2 сначала сравнены временные отклики прототипа асимметричного двухпроводного МФ с лицевой связью (с поперечным сечением, как на рисунке 3.3а), полученные разными методами (в том числе, аналитически по модели (4.6)) для разных сопротивлений на концах пассивного проводника. Выявлена приемлемая согласованность результатов аналитических и измеренных. Затем выполнены измерения во временной и частотной областях 3-проводного МФ на основе МПЛ с двумя заземленными симметричными проводниками (рисунок 6.4). Для подложки использован СТФ-2-105-0,5 с $h=0,29$ мм, $t=0,105$ мм, $\epsilon_r=5,5$ и $\text{tg}\delta=0,035$ при $f=1$ МГц. Площадь на плате – $S=80\times 80$ мм². После оптимизации получены параметры: $w=0,45$ мм, $w_1=0,2$ мм, $s=0,45$ мм. Вычисленные и измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ показаны на рисунке 6.4б. Полоса пропускания по измерениям составила 741 МГц, а моделированию – 756 МГц. Зависимости согласуются, но есть отличия частот и амплитуд максимумов. Затем получены отклики на основе вычисленных электродинамически и измеренных частотных зависимостей S -параметров (рисунок 6.4в). Воздействовал гауссов импульс длительностью 67 пс по уровню 0,5. Кроме того, временной отклик получен по аналитической модели и квазистатическим моделированием. Отклики представлены двумя составляющими. Расхождение аналитических и численных результатов объяснимо учётом потерь и дисперсии в последних. Лучше согласуются результаты электродинамического моделирования и измерений.

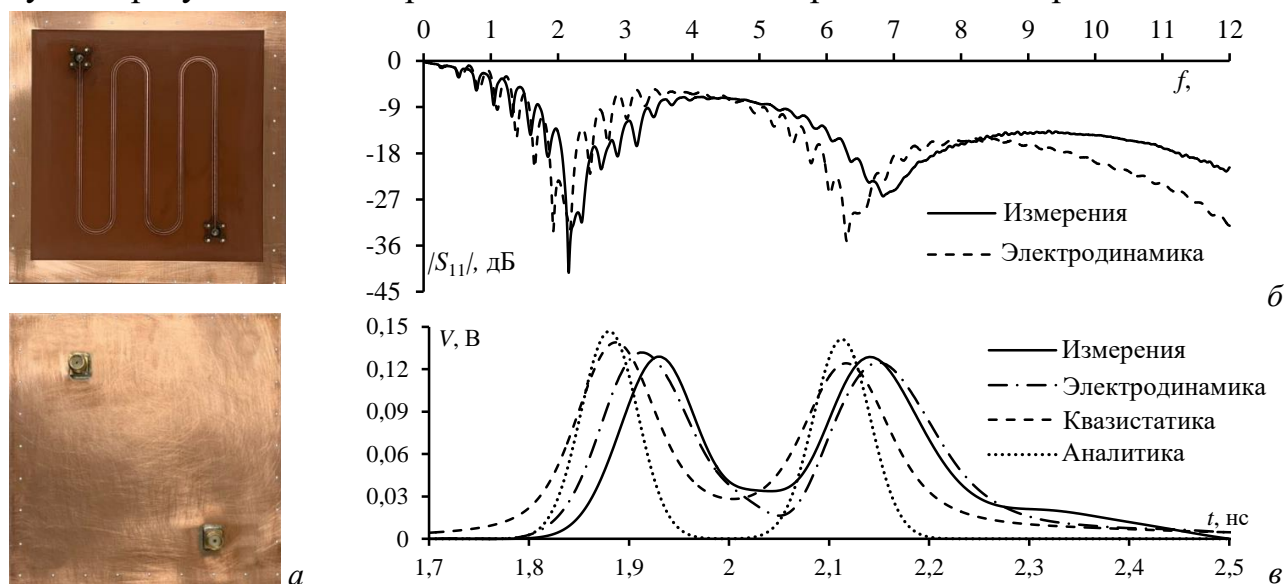


Рисунок 6.4 – Виды сверху и снизу прототипа 3-проводного МФ (а), частотные зависимости $|S_{21}|$ (б) и соответствующие им временной отклик (в) при воздействии гауссова импульса

Для оценки ослабления воздействия вычислены N -нормы (таблица 6.3). Уменьшение N_1 (более 3 раз) происходит из-за разложения воздействия на составляющие меньшей амплитуды с дополнительным ослаблением из-за потерь. Значительное (в 50 раз) уменьшение N_2 также объяснимо уменьшением амплитуды и влиянием потерь и дисперсии. Существенного снижения N_3 и N_4 нет, по-

сколькx увеличивается ширина составляющих и они частично накладываются для всех случаев, кроме аналитики, поскольку она не учитывает потери. Разложение на составляющие уменьшило N_5 более, чем вдвое. Кроме того, оценено ослабление: затухающей синусоиды и радиоимпульса.

Таблица 6.3 – N -нормы, вычисленные при воздействии гауссова импульса

Источник данных	N_1	$N_2 \times 10^{-10}$	$N_3 \times 10^{11}$	$N_4 \times 10^{11}$	$N_5 \times 10^6$
Входное воздействие	0,500	10,61	3,566	3,701	3,552
Аналитика	0,147	0,333	2,060	2,060	1,446
Квазистатика	0,139	0,211	3,406	3,681	1,669
Электродинамика	0,141	0,215	3,491	3,634	1,577
Измерения	0,129	0,203	3,509	3,685	1,659

Затем оценена целостность цифрового сигнала. Поскольку полоса пропускания МФ 750 МГц, то оценка выполнена при скоростях 480 и 1000 Мбит/с. По измеренным частотным зависимостям S -параметров построены глазковые диаграммы прохождения псевдослучайной битовой последовательности по МФ (рисунок 6.5). Они отцентрованы и отображены на времени $2T$. Частые пересечения характеризуют более темные оттенки, а редкие – светлые. Также по результатам электродинамического моделирования вычислены контуры вероятности возникновения постоянной битовой ошибки (наложены в виде BER-контура, на границах которого вероятность возникновения битовых ошибок 10^{-12}). Для 480 Мбит/с маска интерфейса USB 2.0 находится внутри «глаза», что подтверждает передачу без искажений. Для 1000 Мбит/с в виде маски (без привязки к интерфейсу) отмечена область и характеристики относительно периода следования, обеспечивающие неискаженную передачу. В таблице 6.3 сведены параметры диаграмм.

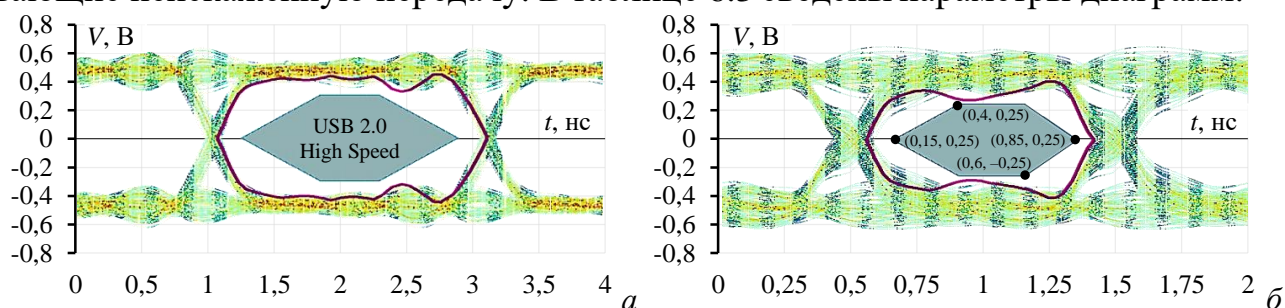


Рисунок 6.5 – Глазковые диаграммы, полученные в результате измерений (цвет) и моделирования (—) при скоростях 480 и 1000 Мбит/с

Таблица 6.3 – Параметры цифрового сигнала на выходе прототипа

Параметры	Измерение		Моделирование	
	480 Мбит/с	1000 Мбит/с	480 Мбит/с	1000 Мбит/с
Высота глаза, мВ	734	560	822	596
Ширина глаза, нс	2,05	0,905	2,08	0,945
Отношение сигнал/шум	12,21	5,05	19,19	7,08
Джиттер, пс	15,6	35	14,1	27

Из таблицы 6.3 видно, что целостность сигнала обеспечивается в каждом случае. Для 480 Мбит/с джиттер составил 15,6 пс, а для 1000 Мбит/с – 35 пс. Поскольку в каждом случае «глаз» открыт, то вероятность возникновения битовых ошибок мала. Высокочастотное рассогласование оказало наибольшее влияние на отношение сигнал/шум. Для 480 Мбит/с оно 12,21, а 1000 Мбит/с – 5,05.

Таким образом, выполнено комплексное исследование прототипа МФ на основе МПЛ с двумя симметричными заземленными проводниками для апробации методики проектирования полосковых устройств.

Всего для апробации методики проектирования измерены 10 различных прототипов МЛ и МФ. *Таким образом, применение предложенной методики параметрической оптимизации, аналитического расчёта формы выходного напряжения по моделям в замкнутом виде и вычисления N -норм для оценки эффективности ослабления ускоряет синтез помехозащитных полосковых устройств с модальным разложением с оптимальными параметрами.*

В разделе 6.3 приведены оценки эффективности разработанных в разделе 4.2 аналитических моделей временного отклика. Для этого сравнены затраты времени на вычисление отклика аналитическими моделями, квазистатическим и электродинамическим моделированием. Также оценена адекватность моделей методом FSV, предложенным для валидации результатов в стандарте IEEE.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты

1. Анализ влияния покрывающих диэлектриков МПЛ показал возможность роста из-за них погонной задержки (до 42%) и волнового сопротивления (до 29,5%).

2. Оценки применимости широко известных моделей вычисления погонной задержки и волнового сопротивления МПЛ к линиям с покрывающими слоями показали, что модели применимы не для всех сочетаний геометрических параметров даже МПЛ без покрытий, а для МПЛ с покрытиями отклонения результатов могут достигать 21 и 25% соответственно.

3. Оценка влияния температуры среды от минус 50 до 150°C на параметры одиночной МПЛ показала, что оно мало (менее 1%) для геометрических параметров поперечного сечения и существенное (до 10%) – для ϵ_r . Изменение погонной задержки и волнового сопротивления из-за этого может достигать 13% и 8% соответственно.

4. Предложена методика квазистатического моделирования многопроводных линий передачи, позволившая выполнить анализ ряда межсоединений реальных печатных плат.

5. Показан оптимальный выбор толщины диэлектрического покрытия для компенсации перекрестных помех, уменьшивший их амплитуду в 2 раза.

6. Предложена и экспериментально подтверждена передача импульсного воздействия по витку МЛ без его искажения ближней перекрестной помехой и модальных, из-за разности фазовых скоростей мод в витке.

7. Предложен способ ослабления импульсных воздействий в витке МЛ, основанный на разложении воздействия в нём на последовательность составляющих с меньшей амплитудой, что экспериментально доказано на примере витка МЛ с боковой (ослабление 6,3 раза) и лицевой (4,2 раза) связью.

8. Предложены устройства, ослабляющие импульсные воздействия, на основе витка МЛ: из двух отрезков, с дополнительными проводниками, многокаскадные и гибридные.

9. Разработаны алгоритмы многократного вычисления ёмкостной матрицы структуры проводников и диэлектриков для ускорения многовариантного анализа полосковых устройств. Показаны ускорения вычисления $m=2^{15}$ ёмкостных матриц (в диапазоне изменения комплексной ϵ_r подложки) до 8,8 раза, а отклика – до 2,15 раза.

10. Разработаны аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальным разложением. Оценки их эффективности показали применимость аналитического расчёта отклика с ускорением до 2 раз (по сравнению с квазистатическим моделированием) и приемлемой согласованностью с результатами измерений во временной области.

11. На основе моделей временного отклика получены условия равенства амплитуд доминирующих составляющих отклика на выходе ряда полосковых устройств с модальным разложением, что позволило получить их нормированные амплитуды.

12. Предложена методика параметрической оптимизации полосковых устройств, отличающаяся от известных тем, что в качестве критериев в ней использованы полученные ранее условия. Продемонстрировано уменьшение времени оптимизация до 300 раз.

13. Предложена методика проектирования устройств защиты на основе связанных полосковых линий, отличающаяся тем, что в её основе лежит методика параметрической оптимизации, аналитический расчёт временного отклика и вычисления N -норм для оценки эффективности ослабления воздействия.

14. Доказана возможность проектирования полосковых устройств на заданной площади печатной платы за счёт их трассировки в виде меандра со слабой электромагнитной связью между полувитками, а также возможность дополнительного уменьшения размеров устройств за счёт добавления развязывающих проводников между его неосновными полувитками.

15. Доказана возможность использования отражений в витке МЛ из двух отрезков для ослабления импульсных помеховых воздействий за счёт взаимной компенсации основных и отраженных составляющих. Показано ослабление воздействия амплитудой 120 В до 3,8 раза.

16. Доказано дополнительное ослабление воздействия в витке МЛ с асимметричным поперечным сечением за счёт увеличения асимметрии, которое приводит к росту амплитуды дополнительной составляющей и уменьшению общего уровня напряжения на выходе витка. Выявлен рост ослабления в 1,46 раза за счёт увеличения асимметрии. На примере витка МЛ с лицевой связью доказано, что добавление дополнительного опорного проводника также увеличивает ослабление в 1,5 раза за счёт роста амплитуды дополнительной составляющей.

17. За счёт измерения характеристик 10 прототипов полосковых устройств с модальным разложением, во временной и частотной областях экспериментально апробированы методики их оптимизации и проектирования.

Результаты работы масштабно использованы: в 20 ОКР и НИР, на 3 производственных предприятиях и в учебном процессе 2 университетов.

Совокупность полученных результатов в диссертационной работе позволяет считать, что её задачи решены, а цель достигнута. *Тем самым, решена проблема эффективной защиты РЭС от СКИ.*

Рекомендации

1. Предложенная методика квазистатического моделирования многопроводных линий передачи рекомендуется для анализа целостности сигналов в межсоединениях реальных печатных плат в отечественной системе компьютерного моделирования TALGAT на ранних этапах проектирования РЭС для снижения затрат на производство конечного устройства.

2. Предложенный метод помехозащиты РЭС с помощью витка МЛ рекомендуется для дополнительного повышения устойчивости специализированного электронного оборудования и бортовых РЭС (например, в АО «РЕШЕТНЁВ» и АО «НПЦ «Полюс») к импульсным СШП помехам и ЭСР.

3. Разработанные аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальным разложением и условия равенства доминирующих составляющих разложения импульсного воздействия на их выходе рекомендуются для оценки амплитуд доминирующих составляющих без вычисления временного отклика устройства.

4. Созданные методики оптимизации и проектирования устройств на основе связанных полосковых линий рекомендуются для быстрого синтеза помехозащитных полосковых устройств с модальным разложением с оптимальными параметрами.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Внедрение аналитических моделей временного отклика, нормированных амплитуд доминирующих составляющих на выходе полосковых устройств с модальным разложением и условий их равенства в системы автоматизированного проектирования.

2. Разработка и исследование подходов к миниатюризации полосковых устройств с модальным разложением для обеспечения устойчивости РЭС к СШП помехам на разных структурных уровнях.

3. Разработка и исследование различных схем трассировки, повышающих ослабление полосковых устройств с модальным разложением, для создания инструментов и методик их структурно-параметрической оптимизации.

4. Применение МЛ для создания последовательности импульсов из импульса мощного генератора.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК (25)

1. **Суровцев Р.С.** Ускорение многократного решения СЛАУ с частично изменяющейся матрицей / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2011. – №2 (24), ч.1. – С. 141–144.

2. **Суровцев Р.С.** Исследование ускорения многократного решения СЛАУ с частично изменяющейся матрицей / Р.С. Суровцев, В.К. Салов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – №10. – С. 22–24.

3. **Суровцев Р.С.** Вычисление матрицы ёмкостей произвольной системы проводников и диэлектриков методом моментов: зависимость ускорения за счет блочного LU-разложения от порядка матрицы СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9/2. – С. 126–130.

4. **Суровцев Р.С.** Использование блочного LU-разложения для ускорения вычислений матрицы ёмкостей в диапазоне изменения диэлектрической проницаемости диэлектрика: состояние дел, новые результаты и перспективы исследований / Р.С. Суровцев, В.К. Салов // Доклады ТУСУР. – 2012. – №2 (26), ч. 2. – С. 47–50.

5. **Суровцев Р.С.** Использование блочного LU-разложения для ускорения вычисления временного отклика связанных линий передачи с учётом частотной зависимости диэлектрической проницаемости подложки / Р.С. Суровцев, В.К. Салов, С.П. Куксенко // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – №3. – Т. 11. – С. 64–69.

6. **Суровцев Р.С.** Методика предварительного моделирования целостности сигналов в межсоединениях печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата в системе TALGAT // Доклады ТУСУР. – 2013. – №3(29). – С. 165–169.

7. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками / **Р.С. Суровцев** [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2014. – 4(34). – С. 36–40.

8. **Суровцев Р.С.** Оценка целостности сигналов в печатных платах системы автономной навигации космического аппарата / Р.С. Суровцев, Т.Р. Газизов // Труды МАИ. – 2015. – № 83. – С. 1–19.

9. Носов А.В. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / А.В. Носов, **Р.С. Суровцев**, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – 3(37). – С. 120–123.

10. **Суровцев Р.С.** Многократное решение системы линейных алгебраических уравнений с помощью блочного LU-разложения для вычисления емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков при изменении ее параметров / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – №3 (37). – С. 132–138.

11. **Суровцев Р.С.** Многократное вычисление емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков с изменяющимися параметрами с помощью блочного LU-разложения при решении СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – №4. – Том 14. – С. 132–137.

12. Куксенко С.П. Сравнение вычислительных и аналитических оценок ускорения многократного решения СЛАУ блочным LU-разложением / С.П. Куксенко, **Р.С. Суровцев** // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19. – №2. – С. 71–75.

13. Носов А.В. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / А.В. Носов, **Р.С. Суровцев**, А.М. Заболотский, Т.Т. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, №3. – С. 47–50.

14. **Суровцев Р.С.** Передача импульсного сигнала по витку меандровой линии без искажения ближней перекрестной наводкой / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Труды МАИ. – 2017. – № 93. – С. 1–13.
15. Носов А.В. Параметрическая оптимизация защитного витка меандровой линии с лицевой связью / А.В. Носов, **Р.С. Суровцев**, Т.Т. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 280–286.
16. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение / Т.Р. Газизов [и др.] // Наноиндустрия. – Том 13. – №S5-2 (102). – 2020. – С. 425–432.
17. Кенжегулова З.М. Сравнение временных откликов асимметричного модального фильтра, полученных разными подходами / З.М. Кенжегулова, **Р.С. Суровцев**, Р.Р. Хажибекон // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25. – №2. – С. 53–59.
18. Малыгин К.П. Ослабление сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии с двумя пассивными проводниками / К.П. Малыгин, А.В. Носов, **Р.С. Суровцев** // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 7. – С. 1–24.
19. **Суровцев Р.С.** Миниатюризация устройства на основе витка меандровой линии с помощью дополнительных заземленных проводников / Р.С. Суровцев, С. Карри, И.А. Скорняков // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т.25, №3. – С. 14–20.
20. **Суровцев Р.С.** Математический аппарат для анализа помехоподавляющих полосковых устройств с асимметричной структурой / Журнал радиоэлектроники. – 2023. – № 2. – С. 1–29.
21. Карри С. Методика синтеза пассивных полосковых устройств защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением / С. Карри, З.М. Кенжегулова, **Р.С. Суровцев** // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 1. – С. 90–109.
22. Карри С. Экспериментальное исследование полосковых устройств защиты с модальным разложением / С. Карри, З.М. Кенжегулова, **Р.С. Суровцев** // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 1–28.
23. Карри С. Экспериментальное исследование характеристик прототипа полоскового устройства защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии / С. Карри, **Р.С. Суровцев** // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 14–20.
24. Карри С. Методика параметрической оптимизации полосковых устройств с модальным разложением / С. Карри, **Р.С. Суровцев**, П.В. Микола, И.А. Скорняков // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 1. – С. 95–117.
25. **Суровцев Р.С.** Комплексное исследование влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка меандровой линии / **Р.С. Суровцев**, И.А. Скорняков, С. Карри / Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – № 2. – С. 30–43.

Доклады в материалах конференции из перечня ВАК (2)

26. Малыгин К.П. Анализ и параметрическая оптимизация эволюционными методами витка меандровой МПЛ с учетом температуры / К.П. Малыгин, А.В. Носов, **Р.С. Суворцев** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – Выпуск 3. – С. 58–65.

27. Ким Г.Ю. Совершенствование анализа распространения импульсных сигналов в структурах из N каскадов связанных линий / Г.Ю. Ким, А.В. Носов, **Р.С. Суворцев** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – Выпуск 3. – С. 82–88.

Монографии (3)

28. Совершенствование моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / В.К. Салов [и др.] // моногр. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 131 с.

29. **Суворцев Р.С.**, Носов А.В. Модальное разложение в меандровых линиях и устройствах на их основе // Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 184 с.

30. **Суворцев Р.С.**, Кенжегулова З.М. Аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальными явлениями – Монография – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 172 с.

Статьи в журналах из Q1 Scopus и WoS (3)

31. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / **R.S. Surovtsev**, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 6. – P. 1864–1871.

32. **Surovtsev R.S.** Comparison of time responses of a meander line turn to ultrashort pulse excitation / **R.S. Surovtsev**, A.V. Nosov, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2022. – Vol. 64, no. 4. – P. 1265–1269.

33. Sagiyeva I.Y. Modal filter based on a microstrip line with two side conductors grounded at both ends / I.Y. Sagiyeva, Y.S. Zhechev, Z.M. Kenzhegulova, **R.S. Surovtsev**, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, no. 5. – P. 1371–1378.

Статьи в журналах, индексируемых Scopus и WoS (12)

34. **Surovtsev R.S.** Analytic evaluation of the computational costs for solving systems of linear algebraic equations in multiple computing of the capacitance matrix in a range of the dielectric permittivity of dielectrics / **R.S. Surovtsev**, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Journal of mathematical sciences. – 2015. – Vol. 207, no.5. – P. 795–802.

35. Nosov A.V. Investigation of possibility of protection against electrostatic discharge using meander microstrip line / A.V. Nosov, **R.S. Surovtsev**, T.R. Gazizov // Journal of Physics: conference series (JPCS). – 2018. – Vol. 1015, no. 2. – P. 1–6.

36. Nosov A.V. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition / A.V. Nosov, A.O. Belousov, **R.S. Surovtsev**, T.R. Gazizov // Journal of Physics: conference series. – 2019. – Vol. 1353, no. 1. – P. 1–6.

37. Malygin K.P. Multicriteria optimization of a meander line with broad-side coupling by genetic algorithms / K.P. Malygin, A.V. Nosov, **R.S. Surovtsev**, T.T. Gazizov, I.Y. Sagiyeva // Journal of physics: conference series (JPCS). – 2020. – Vol. 1679, P. 1–5.

38. Kim G.Y. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines / G.Y. Kim, A.V. Nosov, **R.S. Surovtsev**, T.T. Gazizov, A.E. Maximov // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2020. – Vol. 1679. – P. 1–6.

39. Nosov A.V. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor / A.V. Nosov, **R.S. Surovtsev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862. – P. 1–6.

40. **Surovtsev R.S.** Using a turn of a meander microstrip line for ESD protection / **R.S. Surovtsev**, A.V. Nosov, T.R. Gazizov // ELECTRICA. – 2022. – Vol. 22, no. 1. – P. 84–91.

41. **Surovtsev R.S.** Analytical conditions for equalizing and reducing the amplitudes of the time response components in the meander line turn / Journal of communications technology and electronics. – 2022. – Vol. 67, no. 1. – P. 94–100.

42. **Surovtsev R.S.** Analytical models and conditions for optimal protective meander lines / **R.S. Surovtsev**, A.V. Nosov, T.R. Gazizov // ELECTRICA. – 2022. – Vol. 22, no. 2. – P. 295–300.

43. Mikola P.V. Analysis of the pulse signal propagation in a turn of a meander line of two segments based on lattice diagrams / P.V. Mikola, Z.M. Kenzhegulova, **R.S. Surovtsev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2291. – P. 1–7.

44. Malygin K.P. Ultrashort pulse decomposition in a turn of a meander microstrip line with two passive conductors / K.P. Malygin, A.V. Nosov, **R.S. Surovtsev** // Microwave Review. – 2022. – Vol. 28. – No 2. – P. 28–32.

45. **Surovtsev R.S.** Using reflections in a meander line turn of two segments for suppressing UWB excitations / **R.S. Surovtsev**, P.V. Mikola, I.A. Ivantsov, S. Karri // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2023. – Vol. 13. – pp. 59–68.

Патенты на изобретение (21)

46. Патент на изобретение №2556438 Российская Федерация. Линия задержки, неискажающая импульс / **Суровцев Р.С.**, Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. – Заявка №2013159347; заявлен 30.12.2013; опубликован 16.06.2015, Бюл. №19.

47. Патент на изобретение №2568327 Российская Федерация. Меандровая линия с дополнительной задержкой / **Суровцев Р.С.**, Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. – Заявка №2014108688/08; заявлен 05.03.2014; опубликован 10.09.2015, Бюл. №25.

48. Патент на изобретение №2597940 Российская Федерация. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов / **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. – Заявка №2015120797/28; заявлен 01.06.2015; опубликован 25.08.2016, Бюл. №26.

49. Патент на изобретение №2600098 Российская Федерация. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов /

Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка №2015137528; заявлен 02.09.2015; опубликован 20.10.2016, Бюл. №29.

50. Патент на изобретение №2607252 Российской Федерации. Меандровая микрополосковая линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов / **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка №2015129255/(045208); заявлен 16.07.2015; опубликован 10.01.2017, Бюл. №1.

51. Патент на изобретение №2606776 Российская Федерация. Меандровая линия задержки из двух витков с разными разносами, защищающая от сверхкоротких импульсов / **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка №2015137524; заявлен 02.09.2015; опубликован 10.01.2017, Бюл. №1.

52. Патент на изобретение №2637484 Российской Федерации. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Т.Р. Газизов, **Р.С. Суровцев**, А.В. Носов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов. – Заявка №2016141521; заявлен 21.10.2016; опубликован 04.12.2017, Бюл. №34.

53. Патент на изобретение №2656834 Российской Федерации. Усовершенствованная линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Т.Р. Газизов, **Р.С. Суровцев**, А.В. Носов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов. – Заявка №2016141523; заявлен 21.10.2016; опубликован 06.06.2018, Бюл. №16.

54. Патент на изобретение №2694741 Российской Федерации. Меандровая микрополосковая линия задержки, защищающая от электростатического разряда / Носов А.В., **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р. – Заявка №2018122393; заявлен 18.06.2018; опубликован 16.07.2019, Бюл. №20.

55. Патент на изобретение №2691844 Российской Федерации. Усовершенствованная меандровая микрополосковая линия задержки, защищающая от электростатического разряда / Носов А.В., **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р. – Заявка №2018122394; заявлен 18.06.2018; опубликован 18.06.2019, Бюл. №17.

56. Патент на изобретение №2724970 Российская Федерация. Меандровая линия задержки с лицевой связью из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Носов А.В., **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р. – Заявка №2019138486; заявлен 27.11.2019; опубликован 29.06.2020, Бюл. №19.

57. Патент на изобретение №2724972 Российская Федерация. Меандровая микрополосковая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Носов А.В., **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р. – Заявка №2019138487; заявлен 27.11.2019; опубликован 29.06.2020, Бюл. №19.

58. Патент на изобретение №2724983 Российской Федерации. Усовершенствованная меандровая линия задержки с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов / Носов А.В., **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р. – Заявка №2019140941; заявлен 09.12.2019; опубликован 29.06.2020, Бюл. №19.

59. Патент на изобретение №2742049 Российской Федерации. Меандровая линия задержки с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Носов А.В., **Суровцев Р.С.**, Газизов Т.Р. – Заявка №2019140940; заявлен 09.12.2019; опубликован 02.02.2021, Бюл. №4.

60. Патент на изобретение №2769104 Российская Федерация. Меандровая микрополосковая линия с двумя пассивными проводниками, защищающая от сверхкоротких импульсов / Малыгин К.П., Носов А.В., **Суровцев Р.С.** – Заявка №2021117865; заявлен 21.06.2021; опубликован 28.03.2022, Бюл. №10.

61. Патент на изобретение №2767975 Российская Федерация. Меандровая линия с лицевой связью и пассивным проводником, защищающая от сверхкоротких импульсов / Ким Г.Ю., Носов А.В., **Суровцев Р.С.** – Заявка №2021117712; заявлен 18.06.2021; опубликован 22.03.2022, Бюл. №9.

62. Патент на изобретение №2772792 Российская Федерация. Усовершенствованная меандровая микрополосковая линия с двумя пассивными проводниками, защищающая от сверхкоротких импульсов / Малыгин К.П., Носов А.В., **Суровцев Р.С.** – Заявка №2021117877; заявлен 21.06.2021; опубликован 25.05.2022, Бюл. №15.

63. Патент на изобретение №2772794 Российская Федерация. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов на основе каскадного соединения трехпроводного модального фильтра и витка меандровой линии с лицевой связью / Ким Г.Ю., Носов А.В., **Суровцев Р.С.** – Заявка №2021117857; заявлен 21.06.2021; опубликован 25.05.2022, Бюл. №15.

64. Патент на изобретение №2789340 Российская Федерация. Меандровая микрополосковая линия задержки из трех витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Ким Г.Ю., Носов А.В., **Суровцев Р.С.** – Заявка №2022119263; заявлен 14.07.2022; опубликован 01.02.2023, Бюл. №4.

65. Патент на изобретение №2789435 Российская Федерация. Меандровая линия задержки с лицевой связью из четырех витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Ким Г.Ю., Носов А.В., **Суровцев Р.С.** – Заявка №2022119265; заявлен 14.07.2022; опубликован 02.02.2023, Бюл. №4.

66. Патент на изобретение №2813609 Российская Федерация. Усовершенствованная микрополосковая линия задержки из двух отрезков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Микола П., **Суровцев Р.С.**, Иванцов И.А. – Заявка №2023107076; заявлен 24.03.2023; опубликован 13.02.2024, Бюл. №5.