

На правах рукописи



Черникова Евгения Борисовна

**Зеркально-симметричные
модальные фильтры и меандровые линии**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

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

Научный руководитель – **Заболоцкий Александр Михайлович**,
доктор технических наук, доцент, ТУСУР

Официальные оппоненты – **Дмитренко Анатолий Григорьевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, Национальный исследовательский
Томский государственный университет;

Балзовский Евгений Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
Институт сильноточной электроники СО РАН

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится 5 октября 2021 г. в 09 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/4zbuvm3x>

Автореферат разослан «___» июля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук, профессор



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Радиоэлектронные средства (РЭС) являются неотъемлемой частью жизни человека. Применение РЭС различной степени сложности в разных областях, начиная от бытовой и заканчивая космической, приводит к обострению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Нарушение нормального функционирования в результате воздействия помех может нанести непоправимый ущерб. Особенно это касается оборудования, работа которого критична в отношении безопасности, обеспечения жизнедеятельности и др.

Помехи подразделяются, в зависимости от пути распространения, на излучаемые и кондуктивные. Кондуктивные помехи опасны тем, что проникают в РЭС непосредственно по проводникам, например, по сигнальным или питания. Одним из опасных видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ), которые могут привести к повреждениям или сбоям. На степень нарушения функционирования элементов РЭС влияет мощность СКИ, а также помехоустойчивость РЭС. Из-за малой длительности СКИ, основная энергия генератора расходуется на увеличение его амплитуды. Высокая амплитуда напряжения СКИ приводит к пробоем полупроводниковых приборов и конденсаторов в традиционных помехоподавляющих LC- и RC-фильтрах, время срабатывания варисторов и разрядников может значительно превышать длительность СКИ, а быстродействующие ограничители обладают паразитными параметрами. Кроме того, при воздействии СКИ на РЭС, энергия не успевает распределиться по элементам структуры. Из-за локализации энергии в одной точке увеличивается вероятность отказа в чувствительных областях. В связи с недостатками традиционных защитных устройств, актуальна разработка новых устройств защиты от СКИ.

Степень разработанности темы

Проблема ЭМС критичных РЭС широко освещается на зарубежных конференциях, в частности на форумах международного научного и технического сообщества в области электродинамики высокой мощности в Америке, Европе и Азии. Например, на форуме ASIAEM 2015 проблемы ЭМС рассматривались на отдельных секциях «Преднамеренные электромагнитные помехи (ПД ЭМВ): угрозы, влияния и защита», «Создание устройств защиты и методов испытания» и «Оценка воздействия ПД ЭМВ на критичную инфраструктуру». Помимо этого, в известном журнале «IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility», наряду с публикациями передовых результатов исследований в области ЭМС, также присутствуют разделы, посвященные ПД ЭМВ и технологиям помехозащиты критичных РЭС. Кроме того, разработанность данной темы подтверждается обширными исследованиями известных ученых во всём мире: F. Rachidi (Лозанна, Швейцария), F. Sabath (Мюнстер, Германия), W. Radasky (Metatech Corporation, США), В.Е. Фортов (РАН, Россия), Л.Н. Кечиев (ВШЭ-МГИЭМ, Россия), С.В. Ткаченко (университет Отто фон Герике, Магдебург, Германия).

Исследованием воздействий наносекундных электромагнитных помех на вычислительную технику успешно занимались З.М. Гизатуллин, Р. Киричѐк и С.Ф. Чермошенцев. Вопросы описания параметров мощных электромагнитных импульсов, методы и средства электромагнитной защиты аппаратуры на этапах схемотехнического и конструкторского проектирования исследовали Н.В. Балюк и П.В. Степанов. Излучатели СКИ и методы измерений их параметров исследовали В.П. Беличенко, В.И. Кошелев, К.Ю. Сахаров. Разработкой, основанных на нелинейных элементах, устройств защиты электронных систем от мощных естественных или искусственных электромагнитных помех, в частности СКИ, занимались J.L. ter Haseborg, R. Krzikalla, T. Weber, F. Brauer, C. Klunder. Исследованием микрополосковых конструкций широкополосных полосно-пропускающих фильтров занимаются Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, С.А. Ходенков, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев, В.Ф. Шабанов и др. Многосвязные полосковые структуры исследовали Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов и А.Н. Сычев.

Известна технология модальной фильтрации, исследуемая и применяемая для защиты от СКИ. Она подразумевает использование модальных искажений (изменений сигнала за счет разности задержек мод многопроводной линии передачи) для защиты за счет последовательного модального разложения импульса на импульсы меньшей амплитуды. Активными исследователями в этой области являются Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и А.О. Белоусов. Устройства, функционирующие по принципу модальной фильтрации, называют модальными фильтрами (МФ). Они лишены недостатков традиционных устройств защиты и имеют ряд преимуществ: отсутствие полупроводниковых компонентов (высокая радиационная стойкость), долгий срок службы, работа при высоких напряжениях, малые габариты и низкая стоимость.

Известны различные структурные исполнения МФ: на основе микрополосковых и полосковых линий, в кабельном исполнении и др. Примечателен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации: за счет использования зеркальной симметрии. Он реализован в новом устройстве – зеркально-симметричном МФ. Отдельные аспекты исследования этого устройства представлены в работах А.М. Заболоцкого и А.О. Белоусова, но оно далеко от своего завершения. Поскольку устройство обладает симметричной, относительно двух осей, конфигурацией поперечного сечения, оно и возможные его модификации представляют большой интерес. Однако возможности использования такой симметрии практически неизвестны.

Цель работы – выявить возможности совершенствования защиты радиоэлектронных средств от сверхкороткого импульса за счет зеркально-симметричных структур.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор методов защиты радиоэлектронных средств от импульсных помех.
2. Выполнить параметрическую оптимизацию и анализ зеркально-симметричных модальных фильтров.

3. Выполнить анализ зеркально-симметричных меандровых линий, полученных на основе зеркально-симметричного модального фильтра.

Научная новизна

1. Предложен подход к совершенствованию защиты радиоэлектронных средств от сверхкоротких импульсов за счет использования зеркально-симметричных модальных фильтров, отличающийся многокритериальной оптимизацией, учетом влияния влагозащитного покрытия и корпуса, использованием дополнительной симметрии и модального резервирования, а также аналитических условий выравнивания разностей соседних погонных задержек мод.

2. Предложены зеркально-симметричные структуры, отличающиеся использованием перемычек на концах вместо резисторов для совершенствования характеристик модальной фильтрации.

3. Впервые разработана методика выявления дополнительных импульсов во временном отклике структур с модальным разложением на воздействие сверхкороткого импульса.

Теоретическая значимость

1. Изучены особенности влияния параметров зеркально-симметричных структур на временные и частотные характеристики.

2. Получены аналитические выражения для вычисления погонных задержек мод в зеркально-симметричном модальном фильтре.

3. Выведены аналитические условия выравнивания разностей соседних погонных задержек мод зеркально-симметричного модального фильтра.

4. Приведено качественное сравнение двух видов модальных фильтров: микрополоскового и зеркально-симметричного.

5. Показано влияние экрана на выходное напряжение зеркально-симметричного модального фильтра.

6. Показано, что улучшение характеристик после перехода от 4-проводных к 8-проводным зеркально-симметричным модальным фильтрам затруднено резким увеличением числа мод, каждая из которых имеет свою специфику.

7. Выявлены закономерности появления дополнительных импульсов разложения в асимметричных структурах с модальной фильтрацией.

8. Сформулирована методика выявления дополнительных импульсов во временном отклике асимметричных структур на примере зеркально-симметричных меандровых линий.

Практическая значимость

1. Разработаны макеты зеркально-симметричных модальных фильтров и меандровых линий для экспериментальных исследований модального разложения сверхкороткого импульса.

2. Внедрены результаты исследования зеркально-симметричного модального фильтра в качестве варианта устройства помехозащиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры в АО «ИСС», г. Железногорск. (Акт внедрения).

3. Внедрены результаты вывода аналитических условий выравнивания разностей погонных задержек мод в зеркально-симметричном модальном фильтре и моделирования зеркально-симметричных модальных фильтров в учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР, г. Томск. (Акт внедрения).

4. Получены параметры поперечного сечения 4-х структур зеркально-симметричного модального фильтра, позволяющие минимизировать амплитуду выходного напряжения и получить попарно выравненные напряжения выходных импульсов.

5. Представлены предложения по модификации зеркально-симметричного модального фильтра за счет соединения проводников на концах линии перемычкой.

Методология и методы исследования

В работе использованы моделирование, основанное на методе моментов и модифицированном методе узловых потенциалов, квазистатический и электродинамический анализ, параметрическая оптимизация эвристическим поиском, а также натурный эксперимент на базе скалярного и векторного анализаторов цепей и комбинированного стробоскопического осциллографа.

Положения, выносимые на защиту

1. Структура зеркально-симметричных в поперечном сечении модальных фильтров позволяет получить его оптимальные параметры, не прибегая к эволюционным алгоритмам, модальные фильтры с увеличенным до 8 числом проводников, реализацию 3-кратного модального резервирования и аналитические условия выравнивания разностей соседних погонных задержек мод.

2. Переход от зеркально-симметричного модального фильтра к меандровым линиям, за счет использования перемычек на концах вместо резисторов, позволяет получить разложение сверхкороткого импульса с наличием дополнительных импульсов, задержки которых определяются различными линейными комбинациями погонных задержек мод линии.

3. Методика выявления дополнительных импульсов во временном отклике структур с модальным разложением позволяет определить причины появления и параметры каждого импульса, а также пути улучшения характеристик таких защитных устройств.

Результаты проведенных исследований соответствуют паспорту специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения по п. 9 – разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств.

Достоверность результатов

Достоверность основывается на корректном использовании теории линий передачи и численных методов, согласованности результатов моделирования квазистатическим и электродинамическим подходами, экспериментальных исследований и данных, полученных другими авторами. Реализуемость

предложенных устройств на практике подтверждена моделированием и экспериментально.

Использование результатов исследований

1. 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 г.

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

3. НИР «Разработка методологии создания помехозащитных устройств на основе модальной технологии» по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, проект № МД-365.2018.8, 2018–2019 г.

4. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РФФ 19-19-00424, 2019–2021 г.

5. 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, 2020–2023 г.

6. НИР «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей», грант РФФ 20-19-00446, 2020–2022 г.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: ФЦП ИР (проект RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.), гранта Президента РФ (проект МД-365.2018.8, 2018–2019 г.); РФФ (гранты 19-19-00424 и 20-19-00446); госзадания (проекты №8.9562.2017, 2017–2019 г. и FEWM-2020-0041, 2020–2023 г.); РФФИ (20-37-70020 Стабильность); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2019 г.; на назначение стипендии Президента РФ в 2018, 2019 и 2021 г.; на назначение стипендий Правительства РФ в 2017, 2019, 2020 и 2021 г. студентам и аспирантам по приоритетным направлениям; повышенной государственной академической стипендии студентам за достижения в НИРС в 2017, 2018 и 2019 г.; в стипендиальной программе Благотворительного фонда Владимира Потанина в 2019 г.; на звание «Лучший выпускник ТУСУРа в научно-исследовательской деятельности» в 2019 г.; на назначение стипендии Президента ТУСУР в 2020 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: межд. научно-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2017–2021 г.; межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2017, 2018, 2020 г.; межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2017, 2019 г.; научно-техн. конф. молодых спец. «Электронные и электромеханические системы и устройства» на базе АО «НПЦ Полюс», г. Томск, 2018 г.; IEEE 2018 Sib. symp. on data science and engineering, г. Новосибирск, 2018 г.; Int. Sib. conf. on control and communications (SIBCON-2019), г. Томск, 2019 г.; межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2019, 2020 г.; межд. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы радиопизики (АПР-2019)», г. Томск, 2019 г.; Int multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON-2019), г. Томск, 2019 г.; 18-я межд. конф. «Авиация и космонавтика–2019», г. Москва, 2019 г.; Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Алтай, 2019, 2020, 2021 г.; IEEE Ural symp. on biomedical engineering, radioelectronics and inform. tech. (USBREIT), Россия, 2021 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 49 работах (10 работ без соавторов).

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	3
Статья в журнале, индексируемом SCOPUS (Q1)	2
Публикация в журналах, индексируемых в WoS и SCOPUS	6
Доклад в трудах конференций, индексируемых в WoS и SCOPUS	8
Доклад в трудах отечественных конференций	19
Тезисы в трудах отечественных конференций	3
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	6
Патент на изобретение	2
ИТОГО:	49

Личный вклад. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или при его участии. Обработка и интерпретация моделирования выполнены совместно с *А.О. Белоусовым*. Разработка макетов 4-слойного зеркально-симметричного МФ и зеркально-симметричной меандровой линии и их измерений выполнены совместно с *Е.С. Жечевым*. Отдельные результаты исследования получены совместно с соавторами публикаций. Непосредственный вклад автора состоит в выполнении оптимизации, моделировании, обработке и интерпретации данных, а также подготовке публикаций на всех этапах исследования.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 3 раздела, заключение, список используемых источников из 159 наименований, приложение из 38 с. Объём диссертации с приложением – 241 с., в т.ч. 123 рис. и 59 табл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Защита радиоэлектронных средств от импульсных помех: обзор

В подразделе 1.1 показана актуальность обеспечения ЭМС и помехозащищенности РЭС. В подразделе 1.2 рассмотрены методы защиты РЭС от импульсных помех, в том числе указаны недостатки традиционных устройств защиты. В подразделе 1.3 рассмотрены электродинамический и квазистатический подходы к моделированию защитных устройств. В подразделе 1.4 выполнен обзор модального анализа многопроводных линий передачи и устройств, разработанных на его основе. В подразделе 1.5 рассмотрены устройства защиты от СКИ, работа которых основана на технологии модальной фильтрации, в том числе способы ее совершенствования. В подразделе 1.6 рассмотрена роль зеркальной симметрии в модальной фильтрации. В подразделе 1.7 рассмотрена асимметрия модальных фильтров. В подразделе 1.8 сформулированы цель и задачи работы.

2. Параметрическая оптимизация и анализ модальных фильтров на основе зеркально-симметричных структур

В подразделе 2.1 выполнена оптимизация параметров зеркально-симметричных МФ эвристическим поиском как по двум критериям отдельно, так и одновременно по трем критериям:

1. Минимизация максимального напряжения (U_{\max}) на выходе МФ.
2. Выравнивание временных интервалов между импульсами разложения (Δt_i).
3. Обеспечение согласования с трактом 50 Ом.

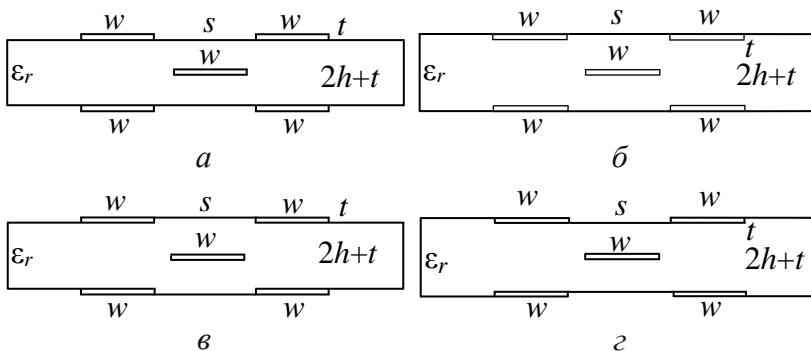


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения структур зеркально-симметричного МФ: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Оптимизировались параметры s и w 4-х структур зеркально-симметричного МФ (рисунок 2.1). Параметры входного воздействия: амплитуда ЭДС – 5 В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 0,05 нс. В силу симметрии достижение

критериев возможно с помощью параметрической оптимизации эвристическим поиском. Результаты оптимизации сведены в таблицу 2.1, из которой видно, что

Таблица 2.1 – Результаты многокритериальной оптимизации

№	w , мкм	s , мкм	U_{\max} , В	Δt_i , нс	$U_{\text{вх}}$, В
1	1600	510	0,625	0,49; 0,49; 0,49	2,5
2	1600	488	0,625	0,47; 0,49; 0,47	2,49
3	1600	567	0,625	0,48; 0,46; 0,47	2,52
4	1600	580	0,625	0,43; 0,49; 0,54	2,53

в структуре 1 длиной 1 м обеспечиваются все 3 критерия, и она может разложить СКИ длительностью до 0,49 нс с ослаблением в 4 раза.

Исходя из этого, она выбрана для дальнейших исследований.

В подразделе 2.2 приведено структурированное представление различных результатов исследования зеркально-симметричного МФ с оптимальными параметрами. Выполнено сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования временных откликов, показавшее согласованность. Исследованы частотные характеристики $|S_{21}|$ МФ. Выполнена оценка влияния влагозащитного покрытия и корпуса на характеристики МФ. Приведено сравнение 4-проводных микрополоскового и зеркально-симметричного МФ. Выявлены особенности зеркально-симметричных МФ, характеризующие их геометрию и свойства.

Выведены аналитические выражения для вычисления погонных задержек мод (τ_i) с помощью матрицы **A** (произведение погонных матриц **L** и **C**, где диагональные и взаимные элементы в силу симметрии одинаковы). На их основе сформулировано аналитическое условие выравнивания разностей погонных задержек мод ($\Delta\tau_i$) путем подстановки выражений (2.1–2.4) в систему (2.5). После преобразований получена новая система (2.6). Посредством подстановки первого уравнения системы (2.6) во второе получено квадратное уравнение (2.7), где A_{13} – неизвестное. В результате выражение (2.8) является условием выравнивания $\Delta\tau_i$ в зеркально-симметричном МФ.

$$\tau_1 = \sqrt{A_{11} - A_{14} - A_{12} + A_{13}}, \quad (2.1)$$

$$\tau_2 = \sqrt{A_{11} + A_{14} - A_{12} - A_{13}}, \quad (2.2)$$

$$\tau_3 = \sqrt{A_{11} - A_{14} + A_{12} - A_{13}}, \quad (2.3)$$

$$\tau_4 = \sqrt{A_{11} + A_{14} + A_{12} + A_{13}}. \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} \tau_4^2 - \tau_1^2 = 3(\tau_3^2 - \tau_2^2) \\ \tau_4 + \tau_1 = \tau_3 + \tau_2 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} A_{12} = 2A_{14} \\ 2A_{11}A_{12}A_{13}A_{14} = A_{12}^2A_{13}^2 + \\ + A_{14}^2A_{12}^2 + A_{14}^2A_{13}^2 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$5A_{13}^2 - 4A_{11}A_{13} + 4A_{14}^2 = 0 \quad (2.7)$$

$$A_{13/2} = \frac{A_{11} \pm \sqrt{A_{11}^2 - 5A_{14}^2}}{2,5} \quad (2.8)$$

Выполнен анализ 4-проводных структур для реализации 3-кратного модального резервирования (МР) (рисунок 2.2). В таблицу 2.2 сведены результаты моделирования временных (с ЭДС 2 В) и частотных характеристик.

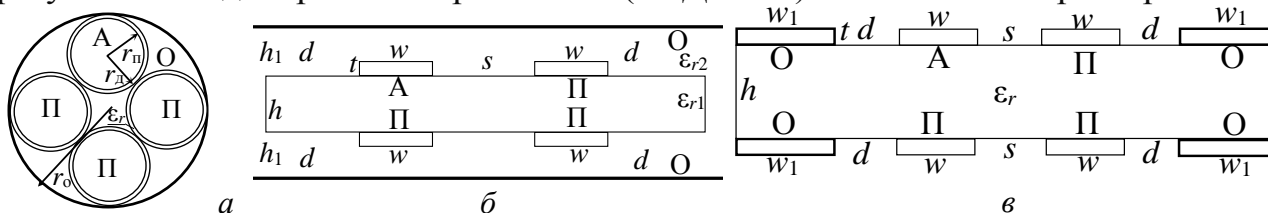


Рисунок 2.2 – Поперечные сечения зеркально-симметричных структур с опорным проводником: вокруг (а), сверху и снизу (б) и в виде боковых полигонов (в)

Таблица 2.2 – Численные характеристики моделируемых структур

Опорный проводник	Параметры						
	U_{max} , В	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м	τ_4 , нс/м	Δf , ГГц	f_1 , ГГц
Вокруг	0,497	5,475	5,475	5,780	6,370	0,337	1,666
Сверху и снизу	0,249	7,164	8,370	8,860	9,170	0,170	0,798
В виде боковых полигонов	0,2437	4,479	4,907	5,873	6,402	0,143	0,331

Анализ таблицы 2.2 позволяет заключить, что данные структуры могут быть использованы для реализации устройств защиты на основе модальной фильтрации, а также, из-за конструктивной реализации, их возможно применить для создания новых устройств с 3-кратным МР.

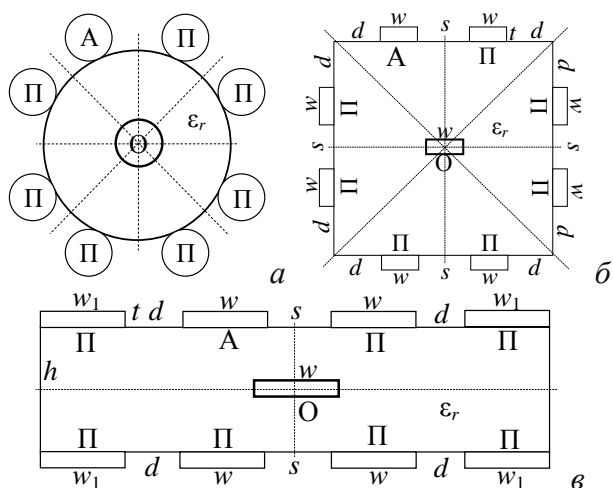


Рисунок 2.3 – Поперечные сечения 8-проводных МФ: кругового (а), квадратного (б) и прямоугольного (в)

улучшить характеристики МФ, но не дает наилучшие результаты сразу, из-за увеличения числа мод, каждая из которых имеет свою специфику, определяемую диэлектрическим заполнением и значениями параметров.

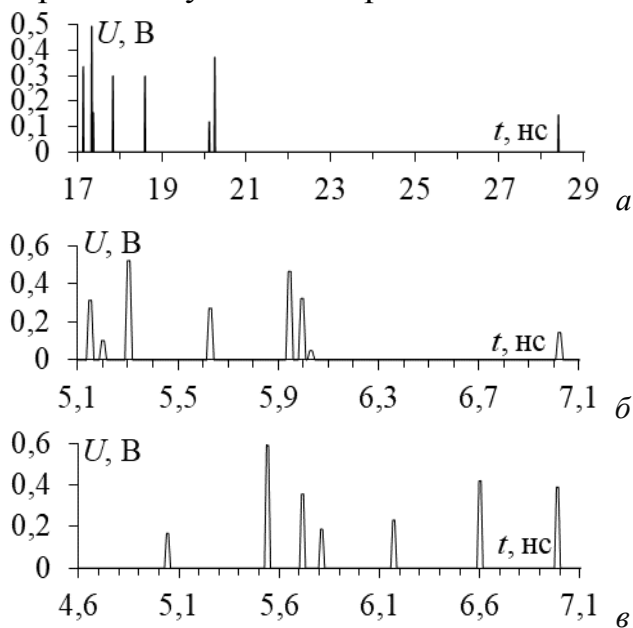


Рисунок 2.4 – Формы напряжения на выходе кругового (а), квадратного (б) и прямоугольного (в) МФ

схемную землю и соединенные скрытыми переходными отверстиями (СПО). Приведено сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования, и получена их согласованность. Изготовлен макет МФ без СПО (рисунок 2.5а) длиной 1 м, согнутый в меандр из 3 полувитков (рисунок 2.5б). Параметры: $s=700$ мкм, $w=1000$ мкм, $t=35$ мкм, $h=920$ мкм, $h_1=510$ мкм.

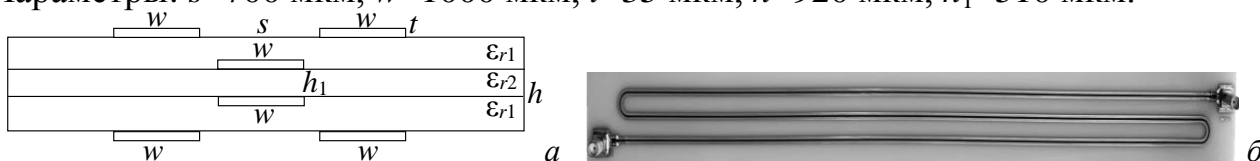


Рисунок 2.5 – Поперечное сечение (а) и макет (б) 4-слойного зеркально-симметричного МФ

Выполнено моделирование 3 структур 8-проводных зеркально-симметричных МФ: кругового, квадратного и прямоугольного (рисунок 2.3). Формы напряжения на выходе МФ приведены на рисунке 2.4. В результате на выходе 8-проводных МФ наблюдается последовательность из 8 импульсов ($U_{max}=0,495$ В, $0,523$ В и $0,592$ В) с коэффициентами ослабления в 5, 4,78 и 4,22 раза соответственно. Между тем показано, что переход от 4 к 8 проводникам МФ с использованием симметрии позволяет

В подразделе 2.3 представлены результаты экспериментального подтверждения модальной фильтрации в зеркально-симметричном МФ. Разработан макет зеркально-симметричного МФ с оптимальными параметрами, однако его реализация затруднительна, поскольку не удовлетворяет стандартному технологическому процессу изготовления. Поэтому разработана новая конструкция, которая представляет собой 4-слойную структуру, где слои 1 и 4 – зеркально расположенная пара связанных линий, а 2 и 3 – проводники, образующие единую

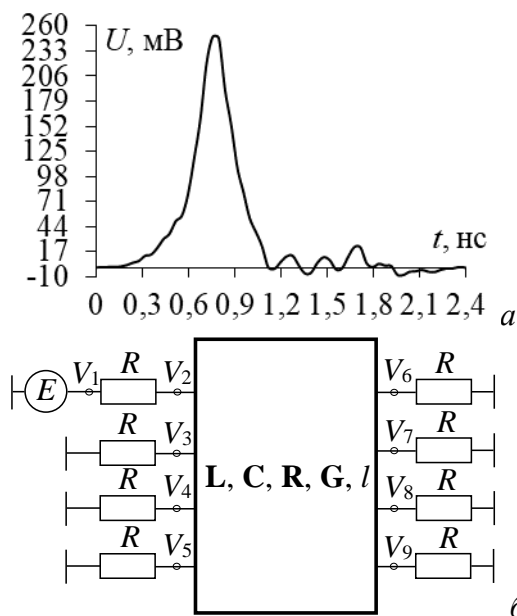


Рисунок 2.6 – Форма напряжения на входе (а) и эквивалентная схема (б)

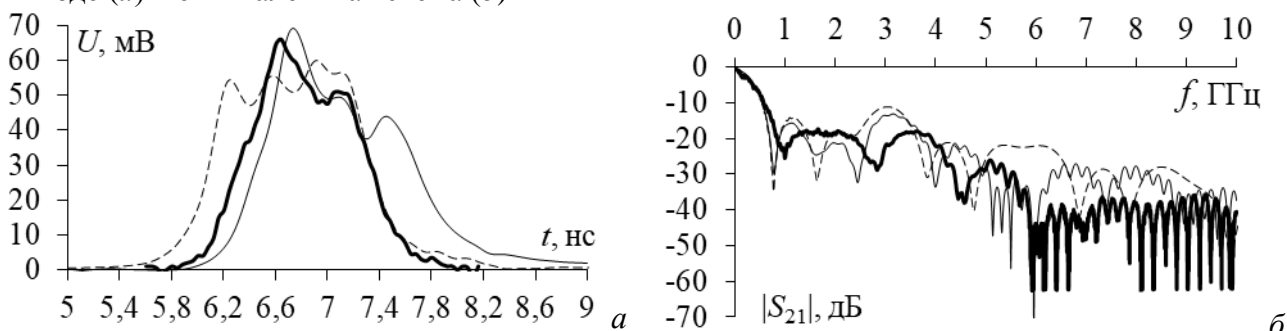


Рисунок 2.7 – Формы напряжения на выходе (а) и частотные характеристики $|S_{21}|$ (б), полученные при эксперименте (—), квазистатическом (---) и электродинамическом (—) моделировании

Таблица 2.3 – Сравнение результатов

Метод	U_{\max} , мВ	Δf , ГГц	f_1 , ГГц
Квазистатика	59,92	0,265	0,766
Электродинамика	68,75	0,295	0,763
Измерения	66	0,25	0,922

Из рисунка 2.7а видно неполное разложение СКИ в МФ, которое вызвано, в первую очередь, большой длительностью входного воздействия. Тем не менее, входное импульсное воздействие с длительностью 257 пс (по уровню 0,5) разложено в зеркально-симметричном МФ на последовательность импульсов с коэффициентом ослабления 3,77 раза при полосе пропускания по уровню минус 3 дБ 0,25 ГГц (по результатам эксперимента).

3. Разложение сверхкороткого импульса в зеркально-симметричной меандровой линии

В данном разделе представлены результаты исследования структур, полученных из зеркально-симметричного МФ посредством различных вариантов электрического соединения проводников на концах линии с помощью перемычек, вместо резистивных окончаний на землю, так что в результате получается зеркально-симметричная меандровая линия (МЛ). При таком соединении полувитков нарушается симметрия граничных условий МФ.

В качестве воздействующего импульса использовался сигнал осциллографа С9-11, измеренный на согласованной нагрузке. Входное воздействие имеет колоколообразную форму, с амплитудой 0,249 В и длительностями фронта – 312 пс, спада – 259 пс и плоской вершины – 8 пс (по уровням 0,1–0,9). Общая длительность импульса (по уровню 0,5) составила – 257 пс (рисунок 2.6а). Эквивалентная схема представлена на рисунке 2.6б. Значения сопротивлений (R) взяты равными 50 Ом. Результаты моделирования двумя подходами и измерений сведены в таблицу 2.3 и показаны на рисунке 2.7.

В подразделах 3.1–3.7 рассматривается разложение СКИ в зеркально-симметричных МЛ из 4, 3 и 2 последовательно соединенных полувитков, из 2 отдельных витков с перемычкой на одном конце линии и на разных концах линии, МЛ, в которой 3 и все 4 проводника соединены на одном конце.

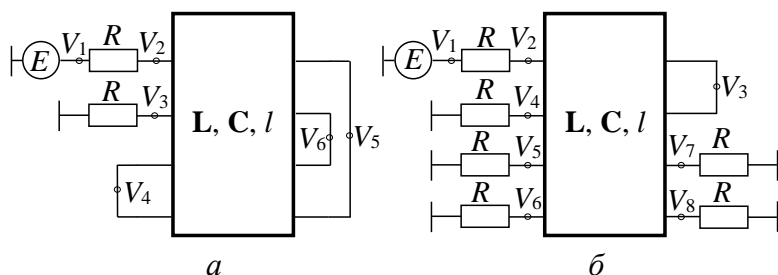


Рисунок 3.1 – Схемы 1 и 2: соединения полувитков из 4 (a) и 2 (б) последовательно соединенных полувитков

На рисунке 3.1 приведены схемы МЛ из 4 и 2 полувитков. Параметры: $s=510$ мкм, $w=1600$ мкм, $t=18$ мкм, $h=500$ мкм, $\epsilon_r=4,5$. На рисунке 3.2 представлены формы напряжений на выходе. Погонные задержки мод сведены в таблицу 3.1.

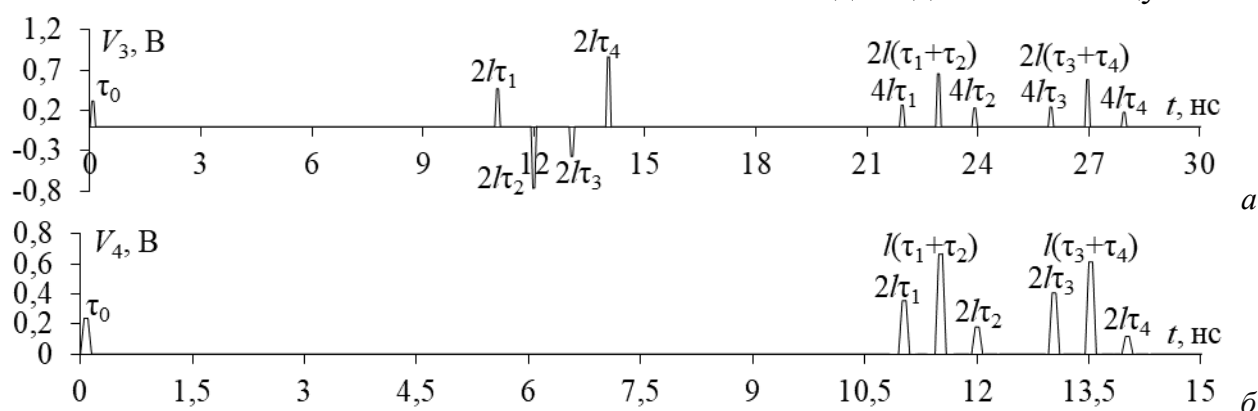


Рисунок 3.2 – Формы напряжения на выходе схем 1 (a) и 2 (б)

Таблица 3.1 – Значения погонных задержек мод (нс/м)

Множитель	1	2	3	4
1	5,46	5,95	6,47	6,96
2	10,93	11,91	12,94	13,93
4	21,87	23,83	25,89	27,87

Первый импульс (с задержкой τ_0) – перекрестная наводка. В схеме 1 в первой группе импульсов, задержки которых кратны 2 погонным задержкам, импульсы 2 и 3 имеют отрицательную полярность. Это связано с отражениями от перемычек на

правом конце схемы. Во второй группе импульсов среди основных импульсов с задержками, кратными 4 погонным задержкам, наблюдаются дополнительные импульсы с задержками, которые равны среднему арифметическому значению определенной пары 4-кратных погонных задержек, умноженному на l : $l(4\tau_1+4\tau_2)/2=2l(\tau_1+\tau_2)=22,85$ нс и $l(4\tau_3+4\tau_4)/2=2l(\tau_3+\tau_4)=26,88$ нс. На выходе схемы 2 помимо основных импульсов, задержки которых равны двойным задержкам 4-х мод, наблюдаются дополнительные импульсы, с задержками равными умноженному на l среднему арифметическому значению удвоенных погонных задержек или просто сумме погонных задержек мод в разных вариантах: $l(2\tau_1+2\tau_2)/2=l(\tau_1+\tau_2)=11,42$ нс и $l(2\tau_3+2\tau_4)/2=l(\tau_3+\tau_4)=13,44$ нс. Наименьшая амплитуда (0,661 В) получена для схемы 2 и определяется амплитудой дополнительных импульсов. Примечательно, что она почти такая же, как у зеркально-симметричного МФ (0,625 В). Возникновение дополнительных импульсов в МФ и МЛ связано с асимметрией (поперечного

сечения и граничных условий). При моделировании согласованных структур МФ на всех концах проводников расположены резисторы с одинаковым номинальным значением, улучшающие согласование всех мод, тогда как безрезистивное исполнение (например, с использованием перемычек между проводниками зеркально-симметричного МФ) приводит к уменьшению волнового сопротивления для одних мод и увеличению – для других. Следовательно, появление дополнительных импульсов связано с распространением волн с разными скоростями во встречных направлениях.

В подразделе 3.8 представлена методика выявления дополнительных импульсов во временном отклике структур с модальным разложением.

1. Задать высокое число отсчетов времени на период повторения импульсов. Увеличение этого числа позволит более корректно отобразить временные отклики (без учета нефизичных импульсов из-за грубой дискретизации по времени).

2. Детально оценить формы импульсов разложения. Отличие формы от трапецевидной может свидетельствовать о наложении нескольких импульсов.

3. Увеличить длину структуры или уменьшить длительность воздействия в 5–10 раз. Это позволяет увеличить значения временных интервалов между импульсами разложения.

4. Изменить параметры поперечного сечения. В силу симметрии некоторых структур, задержки дополнительных импульсов могут совпадать как между собой, так и с основными импульсами. Изменение параметров поперечного сечения позволит, в общем случае, изменить связь между активным и пассивным(и) проводником(ами), что может способствовать увеличению временных интервалов между импульсами разложения.

5. Изменить граничные условия на концах пассивных проводников от 50 Ом до короткого замыкания и холостого хода на землю или между проводниками.

В подразделе 3.9 представлены вычислительный и натурный эксперименты для зеркально-симметричной МЛ. Сравнивались результаты квазистатического и электродинамического моделирования временного отклика на воздействие СКИ длительностью 0,15 нс и амплитудой ЭДС 5 В при $l=1$ м и $R=50$ Ом с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Фрагмент формы выходного напряжения для зеркально-симметричной МЛ из 2-х последовательно соединенных полувитков представлен на рисунке 3.3.

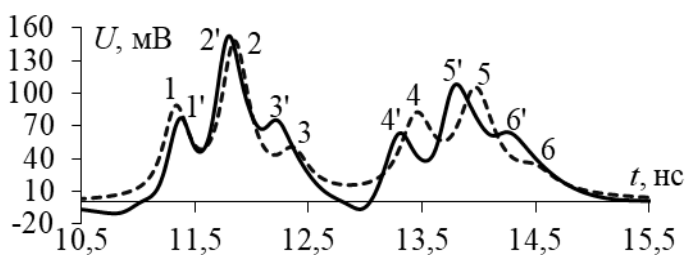


Рисунок 3.3 – Формы напряжения на выходе МЛ из 2-х полувитков при квазистатическом (---) и электродинамическом (—) моделировании

На рисунке 3.3 наблюдаются основные импульсы, их задержки пропорциональны удвоенным погонным задержкам (1, 3, 4, 6 – для квазистатики и 1', 3', 4', 6' – для электродинамики). Также различимы дополнительные импульсы (2, 5 – для квазистатики и 2', 5' – для электродинамики).

Дополнительные импульсы находятся по центру между основными, подтверждая, что их задержки равны умноженному на длину линии среднему арифметическому значению удвоенных погонных задержек.

В качестве прототипа для проведения измерений взят макет 4-слойного зеркально-симметричного МФ (рисунок 2.5б). Для измерений использовался векторный анализатор цепей ZVA 40 (ROHDE&SCHWARZ). Измерения S -параметров проведены в тракте 50 Ом, частотном диапазоне от 10 МГц до 26,5 ГГц, с шагом 5 МГц. Временной отклик был сформулирован как функция параметров, определенных экспериментально в частотной области и вычислялся с помощью обратного преобразования Фурье в системе ADS.

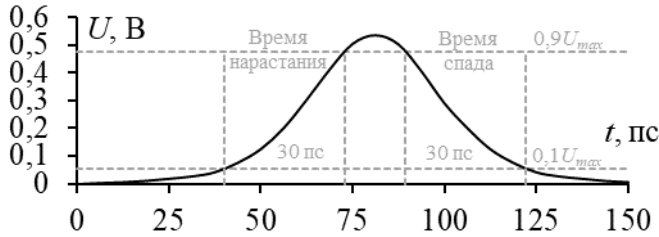


Рисунок 3.4 – Форма ЭДС воздействующего СКИ

Параметры воздействующего импульса (рисунок 3.4): ЭДС – 534 мВ, время фронта и спада – 30 пс (по уровням 0,1–0,9), общая длительность – 65 пс (по уровню 0,5). Фрагменты формы

напряжения на выходе зеркально-симметричной МЛ из 2 последовательно соединенных полувитков, полученные в результате квазистатического и электродинамического моделирования, а также эксперимента, представлены на рисунке 3.5а. Частотные характеристики $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 4 ГГц и сравнение их с электродинамическим моделированием показаны на рисунке 3.5б.

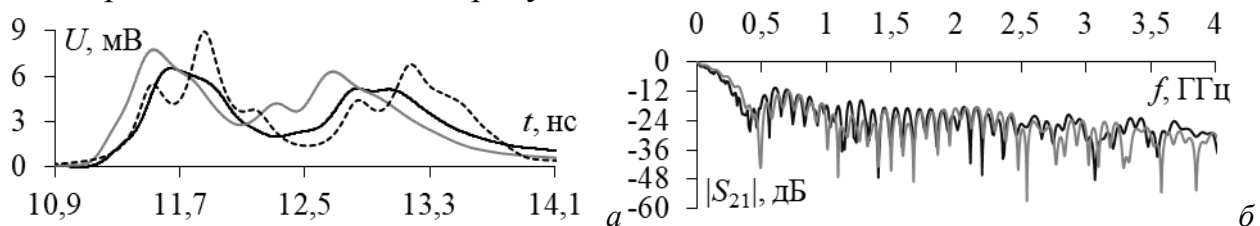


Рисунок 3.5 – Формы напряжения на выходе МЛ (а) и частотные зависимости $|S_{21}|$ (б), полученные при эксперименте (—), квазистат. (---) и электродин. (—) моделировании

Из рисунка 3.5а видно, что СКИ разложился на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Однако из-за наличия потерь в проводниках и диэлектрике, а также из-за частотной зависимости ϵ_r , наблюдается выраженная дисперсия. Разница амплитуд разложенных импульсов, полученных в ходе вычислительного эксперимента и измерений, для схемы 1 составила 1,2 мВ (16,6%) и 1,1 мВ (18,1%) для электродинамического и квазистатического моделирования, соответственно. Между тем время прихода импульсов разложения хорошо согласуется, хотя точная оценка значений τ_i затруднительна из-за наложения импульсов ввиду сильной дисперсии. Однако анализ форм напряжений на выходе МЛ показал, что последовательность разложения включает в себя дополнительные импульсы (особенно это заметно при квазистатическом моделировании, где из-за специфики учета потерь дисперсия менее выражена). Из рисунка 3.5б следует, что значения Δf в результате измерений и электродинамического анализа составили 112 МГц и 92 МГц, а частоты первого резонанса (f_1) – 476 МГц и 487 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования. Из-за расположения проводников и диэлектрика, относительно опорного проводника, в зеркально-симметричном МФ обеспечиваются одновременно торцевая и лицевая связи, что позволяет получить попарно выравненные напряжения импульсов разложения и близкие значения временных интервалов между ними. В силу симметрии, это достижимо посредством обычной параметрической оптимизации эвристическим поиском, не прибегая к затратным глобальным методам оптимизации (например, эволюционным алгоритмам). Оптимизированный зеркально-симметричный МФ позволяет разложить СКИ длительностью до 0,5 нс на 4 основных импульса с амплитудами в 4 раза меньшими, чем на входе.

В зеркально-симметричном МФ диагональные элементы матриц **L** и **C** одинаковы. Одинаковы и некоторые взаимные элементы, в зависимости от расположения относительно земли. Эта особенность использована для вывода аналитических выражений для расчета погонных задержек мод в сокращенном виде. Сформулированные на основе этих выражений аналитические условия позволяют выравнить значения разностей погонных задержек без вычисления соответствующей матрицы и временных откликов.

4-проводные структуры с зеркальной симметрией различных конфигураций поперечного сечения с опорным проводником: вокруг, сверху и снизу, а также в виде боковых полигонов, могут быть использованы для реализации защиты на основе модальной фильтрации и для создания новых устройств с 3-кратным МР.

Квазистатическое моделирование круглой, квадратной и прямоугольной структур 8-проводного зеркально-симметричного МФ показало, что на выходе исследуемых МФ наблюдается последовательность из 8 импульсов с коэффициентами ослабления в 5; 4,78 и 4,22 раза соответственно. Между тем переход от 4 к 8 проводникам МФ с использованием симметрии позволяет улучшить характеристики МФ, но не дает наилучшие результаты сразу, из-за резкого увеличения числа мод, каждая из которых имеет свою специфику, определяемую диэлектрическим заполнением и значениями параметров.

В зеркально-симметричных МЛ выявлена возможность появления дополнительных импульсов в выходном сигнале. Выявлено, что значения задержек дополнительных импульсов определяются различными линейными комбинациями погонных задержек мод линии, в частности они могут быть равны умноженному на длину проводника среднему арифметическому значению удвоенных погонных задержек двух мод (или просто сумме погонных задержек). Сформулирована методика выявления дополнительных импульсов во временном отклике структур с модальным разложением. Показана возможность совершенствования модальной фильтрации за счет дополнительных импульсов.

Рекомендации. Зеркально-симметричные МФ и МЛ могут быть использованы для защиты РЭС от СКИ, проходящих по цепям питания и сигнальным цепям как в виде отдельного устройства, так и в совокупности с

уже имеющимися. Результаты могут использоваться для дальнейших исследований и возможности создания различных конфигураций устройств защиты как на основе структур с зеркальной симметрией, так и абсолютно новых. Подходы к моделированию и оптимизации могут быть применены в образовательном процессе высших учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Оптимизация зеркально-симметричных МЛ по критериям выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения (в том числе между дополнительными). Оптимизация зеркально-симметричных МФ и МЛ под конкретные цепи и устройства, в том числе использование диэлектриков с высокой ϵ_r . Использование структур с зеркальной симметрией в модальном резервировании.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Жечев, Е.С. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Е.С. Жечев, Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №2. – С. 162–179.

2. Черникова, Е.Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 2. – С. 280–293.

3. Черникова, Е.Б. Модальное разложение сверхкороткого импульса в 8-проводных зеркально-симметричных структурах / Е.Б. Черникова, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 9. – С. 1–17.

Статья в журнале, входящем в Q1 Scopus

4. Chernikova, E.B. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – Vol. 11(7), No. 883. – 2019. – P. 1–25.

5. Belousov, A.O. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Medvedev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // Symmetry. – Vol. 12(7), No. 1117. – 2020. – P. 1–38.

Публикации в журналах, индексируемых WoS и Scopus

6. Belousov, A.O. Quasi-static and electrodynamic simulation of reflection symmetric modal filter time response on ultra-short pulse excitation / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1015. – No. 032015. – P. 1–5.

7. Chernikova, E.B. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander line of four cascaded half-turns / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // IOP Conf. Ser.: Mat. Science and Eng. – 2019. – Vol. 597. – No. 012067. – P. 1–6.

8. Chernikova, E.B. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander lines of three cascaded half-turns / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Journal of physics: conf. ser. – 2019. – Vol. 1353. – No. 012022. – P. 1–6.

9. Chernikova, E.B. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander lines of two cascaded half-turns / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Journal of physics: conf. ser. – 2020. – Vol. 1499. – No. 012029. – P. 1–5.

10. Chernikova, E.B. Evaluating the influence of the magnetic permeability of the microstrip modal filter substrate on its frequency characteristics / E.B. Chernikova, A.A. Kvasnikov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // Journal of physics: conf. ser. – 2020. – Vol. 1611. – No. 012032. – P. 1–4.

11. Chernikova, E.B. Studying the structures of modal filter with circular reflection symmetry / E.B. Chernikova // Journal of physics: conf. ser. – 2021. – Vol. 1862. – No. 012027. – P. 1–5.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

12. Chernikova, E.B. Comparative analysis of microstrip and reflection symmetric four-conductor modal filters / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, A.O. Zabolotsky // Proc. of international siberian conference on control and communications (SIBCON–2019), Tomsk, Russia, April 18–20, 2019. – P. 1–4.

13. Zhechev, Y.S. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter / Y.S. Zhechev, E.B. Chernikova, A.O. Belousov // 20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2019. – P. 108–112.

14. Chernikova, E.B. Analysis of frequency characteristics of a reflection symmetric modal filter / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of IEEE 2019 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. – P. 0212–0216.

15. Chernikova, E.B. Method for detecting additional pulses in the time response of structures with modal decomposition / E.B. Chernikova, A.O. Belousov // Proc. of IEEE 2019 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. – P. 0245–0249.

16. Chernikova, E.B. Reflection symmetric meander line protecting against ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov // Proc. of 21 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2020). – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2020. – P. 165–168.

17. Chernikova, E.B. Using composite insulating materials to improve modal filter performance / E.B. Chernikova, A.A. Ivanov // Proc. of 21 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2020). – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2020. – P. 187–190.

18. Chernikova, E.B. Multivariate analysis of multiconductor transmission lines for triple modal reservation / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky // Proc. of 22 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2021). – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2021. – P. 1–5.

19. Chernikova, E.B. Quasi-static analysis of shielded multiconductor transmission lines for triple modal reservation / E.B. Chernikova, A.O. Belousov // Proc. of 2021 IEEE Ural symposium on biomedical engineering, radioelectronics and information technology – Russia, May 13–14, 2021. – P. 1–5.

Патенты

20. Патент на изобретение №2726743 РФ. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов. – Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Черникова Е. – Заявка № 2019140186; заявлен 09.12.2019; опубликован 15.07.2020. Бюл. №20.

21. Патент РФ на изобретение №2732607 РФ. Способ однократного модального резервирования межсоединений. – Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Черникова Е. – Заявка №2019140187; заявлен 09.12.2019; опубликован 25.09.2020. Бюл. №27.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618763. Анализ четырехпроводного зеркально-симметричного модального фильтра. Авторы: Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Заявка №2019617559. Дата поступления 24.06.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.07.2019 г.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618764. Анализ четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра. Авторы: Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Жечев Е.С. Заявка №2019617564. Дата поступления 24.06.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.07.2019 г.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618824. Анализ двухпроводного зеркально-симметричного модального фильтра. Авторы: Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Жечев Е.С. Заявка №2019617591. Дата поступления 24.06.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2019 г.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618825. Анализ зеркально-симметричной меандровой линии из четырех последовательно соединенных полувитков. Авторы: Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Заявка № 2019617592. Дата поступления 24.06.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2019 г.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019619026. Оптимизация четырехпроводного зеркально-симметричного модального фильтра. Авторы: Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Заявка №2019617572. Дата поступления 24.06.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.07.2019 г.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019619027. Анализ зеркально-симметричной меандровой линии из двух последовательно соединенных полувитков. Авторы: Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Заявка №2019617569. Дата поступления 24.06.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.07.2019 г.