

На правах рукописи



Лакоза Александр Михайлович

**Модели, методики и технические решения для защиты
радиоэлектронных средств от сверхкоротких импульсов
в синфазном и дифференциальном режимах**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2025

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

Научный руководитель – **Костелецкий Валерий Павлович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры
сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР

Официальные оппоненты – **Горбачев 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 «17» марта 2026 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/10fj0m6b>

Автореферат разослан ____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные тенденции развития радиоэлектронных средств (РЭС) управления, связи и обработки информации характеризуются непрерывным ростом степени интеграции элементной базы, повышением тактовых частот и плотности монтажа. При этом происходит снижение уровней питающих напряжений электронных компонентов до единиц вольт и ниже. Это приводит к снижению порогов помехоустойчивости и, как следствие, существенно повышает чувствительность систем к внешним и внутренним электромагнитным воздействиям. В условиях сложной электромагнитной обстановки опасность для низковольтной электроники представляют импульсные электромагнитные помехи (ЭМП), в частности сверхкороткие импульсы (СКИ). Обладая субнаносекундной длительностью и широким спектром, они способны проникать в уязвимые цепи, минуя традиционные средства защиты. Наводки критического уровня, индуцируемые этими воздействиями, могут приводить как к обратимым функциональным сбоям, так и к необратимым поражениям. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС требует защиты от подобных воздействий. Задача осложняется необходимостью одновременного подавления помех, распространяющихся в синфазном и в дифференциальном режимах. На практике помеховый сигнал редко существует только в одном из режимов распространения, что требует комплексного подхода к проектированию устройств защиты. Традиционные схемотехнические и конструкторские методы, такие как экранирование, фильтрация, применение ограничителей напряжения и оптимизация топологии печатных плат, зачастую не обеспечивают достаточной эффективности. Классические устройства защиты обладают значительными массогабаритными показателями, а полупроводниковые ограничители из-за наличия паразитных параметров не могут обеспечить требуемые характеристики. Таким образом, возникает противоречие между необходимостью эффективного подавления помех и требованиями к уменьшению массогабаритных характеристик устройств. Несмотря на значительный задел отечественных и зарубежных исследований в области ЭМС, задача создания компактных и надежных устройств защиты, обеспечивающих одновременное подавление синфазных и дифференциальных помех, решена не в полной мере, что определяет актуальность разработки новых устройств защиты от СКИ, работающих в синфазном и дифференциальном режимах, для повышения помехозащищённости современных РЭС.

Степень разработанности темы. Проблема разработки методов и средств обеспечения ЭМС современных РЭС является актуальным направлением исследований и широко обсуждается на различных форумах, симпозиумах и конференциях, например, зарубежных EMC Europe, ESA Workshop on Aerospace EMC, Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI), International Exhibition with Workshops on Electromagnetic Compatibility (Expo-EMV) и отечественных «Электромагнитная совместимость», «Микроэлектроника», «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS). Дополнительно, актуальность данного

направления исследования подтверждается обширным перечнем результатов и апробаций, полученных исследователями во всем мире.

Так, исследования в области ЭМС отражены в работах отечественных исследователей: Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев и А.Д. Князев – основы обеспечения и стандартизации ЭМС; Б.Б. Акбашев, В.И. Кравченко, С.И. Макаренко, Е.Д. Пожидаев и В.А. Туркин – преднамеренные деструктивные воздействия; Б.А. Беляев, М.В. Костенко и Н.Д. Малютин – полосковые структуры и устройства защиты; А.М. Костроминов, А.П. Пудовкин и С.А. Сухоруков – методы и средства защиты от СКИ; Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, В.П. Костелецкий и И.Е. Самотин – принцип модального разложения помеховых сигналов и устройства защиты на его основе. Известен вклад зарубежных исследователей: J. Barnes, H. Ott, C. Paul, W. Radasky, T. Williams – совершенствование обеспечения и моделирования ЭМС РЭС; C. Baum, R. Gardner, J. Nitsch, M. Wik – высокомошные преднамеренные ЭМП; M. Antivachis, D. Boroyevich, H. Kim, T. Tobana, T.L. Wu – устройства подавления и защиты от преднамеренных ЭМП; B. Archambeault, I. Novak, A. Ruehli – связанные многопроводные и полосковые устройства защиты. Несмотря на широту исследований, создание устройств защиты от СКИ с уменьшенными габаритами, работающих одновременно в синфазном и дифференциальном режимах, остается актуальным. Также, критические отрасли предъявляют повышенные требования, например, к защите, которая должна функционировать при значительном изменении температур, длительных перегрузках, сильных вибрациях, высокой влажности и радиации. Одновременно с этим необходимо учитывать уровни напряжения пробоя, максимально допустимые токи и массогабаритные характеристики.

Цель работы – разработать подходы к повышению характеристик устройств защиты от сверхкоротких импульсов, работающих в синфазном и дифференциальном режимах.

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

1. Выполнить обзор современных устройств фильтрации и устройств защиты от электромагнитных помех.
2. Исследовать возможности для совершенствования характеристик устройств защиты с модальным разложением, работающих в синфазном и дифференциальном режимах.
3. Разработать и экспериментально исследовать устройства защиты с модальным разложением, работающие в синфазном и дифференциальном режимах, на основе 6- и 8-проводных структур.
4. Исследовать возможность улучшения характеристик устройства защиты от сверхкоротких импульсов, работающего в синфазном и дифференциальном режимах, за счет гибридизации планарного фильтра подавления электромагнитных помех и структуры с модальным разложением.

Научная новизна

1. Предложено устройство защиты от сверхкоротких импульсов с использованием центральной симметрии проводников, работающее в синфазном и дифференциальном режимах и отличающееся объединением двух структур в единую конструкцию на общем диэлектрическом основании.

2. Предложены устройства защиты от сверхкоротких импульсов, работающие в синфазном и дифференциальном режимах с центрально-симметричным в поперечном сечении расположением проводников, выполненные в виде единой конструкции из двух структур с соединенными на ближнем и дальнем концах опорными проводниками, отличающиеся увеличением числа проводников с 4 до 6 и 8 и симметричным воздействием помехи для 6-проводной и асимметричным – для 8-проводной структур.

3. Впервые предложена методика проектирования планарного гибридного устройства защиты от сверхкоротких импульсов, работающего в синфазном и дифференциальном режимах, на основе пассивного помехоподавляющего фильтра и полосковой структуры с модальным разложением.

Теоретическая значимость

1. Изучены влияние числа, расположения и схемы соединения проводников на уровень максимальное напряжение на выходе устройств защиты в синфазном и дифференциальном режимах.

2. Получены зависимости влияния параметров поперечного сечения на задержки мод, временные интервалы и коэффициенты затухания устройств защиты, работающих в синфазном и дифференциальном режимах.

3. Изучено влияние материала диэлектрической подложки на максимальное напряжение на выходе устройств защиты в синфазном и дифференциальном режимах.

4. Оценено влияние расположения каскадов и расстояния до экранирующего корпуса на коэффициент затухания и погонные задержки устройств защиты, работающих в синфазном и дифференциальном режимах.

Практическая значимость

1. Разработаны и внедрены схемная математическая модель и прототип помехоподавляющего фильтра в АО «Решетнев» (акт внедрения).

2. Внедрены результаты моделирования и экспериментального исследования устройств защиты на основе 6- и 8-проводных структур и экранированных полосковых структур в учебный процесс ТУСУРа (два акта внедрения).

3. Внедрены результаты квазистатического и электродинамического моделирования и экспериментальных исследований частотных и временных характеристик прототипов 6- и 8-проводных устройств защиты в НИР по грантам РФФИ и госзадания (три акта внедрения).

4. Сформулирована методика проектирования гибридных планарных устройств защиты, сочетающих преимущества полосковых устройств защиты с эффектом модального разложения и пассивных помехоподавляющих фильтров.

5. Предложены рекомендации по выбору топологии поперечного сечения, геометрических параметров, материалов, расположения каскадов и расстояния до экрана для реализации устройств защиты с эффектом модального разложения.

6. Разработаны и изготовлены макеты устройств защиты, работающих в синфазном и дифференциальном режимах: экранированного центрально-симметричного, с горизонтальным расположением каскадов и на основе 6- и 8-проводных полосковых структур.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенное устройство защиты, с использованием центральной симметрии проводников на общем диэлектрическом основании, вносит затухание сверхкороткого импульса длительностью 300 пс до 14 дБ в синфазном и дифференциальном режимах.

2. Предложенные 6- и 8-проводные устройства защиты, каждое в виде единой конструкции из двух структур с соединенными на концах опорными проводниками, вносят затухание сверхкороткого импульса длительностью до 300 пс в синфазном и дифференциальном режимах до 30,8 и 31 дБ для 6-проводной структуры при симметричном воздействии помехи и до 33,3 и 28 дБ для 8-проводной структуры при асимметричном воздействии помехи.

3. Созданная методика позволяет проектирование планарного гибридного устройства защиты от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах, на основе пассивного помехоподавляющего фильтра и полосковой структуры с модальным разложением.

Методология и методы исследования. Использован комплексный подход, сочетающий компьютерное моделирование, основанное на электродинамическом и квазистатическом подходах, а также экспериментальные исследования, реализованные с помощью векторного и скалярного анализаторов цепей, стробоскопического осциллографа, измерителя иммитанса и измерителя электромагнитных помех.

Достоверность результатов подтверждается согласованностью результатов вычислительных и лабораторных экспериментов. Основные результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях, а также в рецензируемых научных изданиях. Практическая реализуемость подтверждена изготовленными макетами устройств защиты.

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 гг.

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

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

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

5. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РНФ 19-19-00424, 2019–2021 гг.

6. НИР «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей», грант РФФИ 20-19-00446-П, 2023–2024 гг.

7. НИР «Разработка методического подхода, технических решений и прототипов новых устройств защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов, работающих в дифференциальном и синфазном режимах», грант РФФИ 23-79-01216, 2023–2025 гг.

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

9. НИР «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий», госзадание FEWM-2024-0005, 2024–2026 гг.

10. Учебный процесс радиотехнического факультета ФГАОУ ВО ТУСУРа в 2022–2023 и 2024–2025 гг.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: ФЦП ИР (проект RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.), РФФИ (гранты 20-19-00446, 19-19-00424, 23-79-01216, в т.ч. на их продолжение), государственных заданий (FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг., FEWM-2024-0005, 2024–2026 гг., FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.), РФФИ (20-37-70020 (Стабильность), 2019–2021 г.); на назначение стипендий Правительства РФ 2019 и 2020 г.; на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2022 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: Межрегиональная науч. конф. «Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи», г. Тула, 2020 г.; Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2019–2022 г.; Межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Научная сессия ТУСУР 2020, 2022 и 2023; Межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2021, 2025 г.; Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 26-й Всеросс. молодежной научной конф., г. Ульяновск, 2023 г.; IEEE Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Алтай, 2022 и 2023 г.; Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon), Магнитогорск, 2022 и 2023 г.; Int. Russian Smart Industry Conf. (SmartIndustryCon), Сочи, 2024 и 2025 г.; Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Сочи, 2024 и 2025 г.; Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon), Сочи, 2024 и 2025 г.; IEEE Int. Conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Новосибирск, 2024 г.

Публикации. Результаты отражены в 35 публикациях (3 без соавторов): 5 в журналах из перечня ВАК, из них 3 по научной специальности 2.2.13, 1 по смежной отрасли и 1 по смежной специальности; 13 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 12 докладов в трудах отечественных

конференций; 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 2 патента на изобретение.

Личный вклад. Цель и задачи определены совместно с научным руководителем. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или совместно с научным руководителем. Обработка и интерпретация данных выполнена совместно с научным руководителем. Часть результатов компьютерного моделирования получена при участии *Черниковой Е.Б.* Отдельные результаты исследования получены совместно с соавторами публикаций. Личный вклад автора состоит в разработке геометрических и схемных моделей, моделировании и измерении устройств защиты, а также в подготовке РИД и научных публикаций.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список используемых источников из 126 наименований, приложение из 20 с. Объем диссертации с приложением – 237 с., в т. ч. 178 рисунков и 65 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор современных устройств защиты от кондуктивных электромагнитных помех в радиоэлектронных средствах

В подразделе 1.1 показана актуальность решения проблемы кондуктивных электромагнитных помех в современных РЭС. В подразделе 1.2 приведены используемые методики и подходы к анализу устройств защиты. В подразделе 1.3 сформулированы цель и задачи работы.

2. Устройства защиты от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах на основе центрально-симметричных структур

В подразделах 2.1–2.3 исследовано полосковое устройство защиты от СКИ в синфазном и дифференциальном режимах: выбрано поперечное сечение на основе анализа зависимости коэффициента затухания от ширины проводников и расстояния между структурами, оценено вносимое затухание в двух вариантах расположения проводников с различными оконечными нагрузками, а также при воздействии различных типов помех. В подразделе 2.4 представлены результаты влияния расположения проводников на внешних и внутренних слоях полоскового устройства защиты, а также диэлектрического заполнения воздухом и радиопоглощающим материалом. В подразделе 2.5 приведены результаты экспериментального исследования полоскового устройства защиты от СКИ в синфазном и дифференциальном режимах, на основе каскадированной центрально-симметричной экранированной структуры. В подразделе 2.6 выполнена оценка уровней излучения и восприимчивости к электромагнитным помехам экранированного полоскового устройства защиты в каскадном исполнении длиной 110+220 мм. В подразделе 2.7 предложен подход к разработке устройств защиты от СКИ, работающих в дифференциальном и синфазном режимах, основанный на использовании общего диэлектрического основания для размещения на нем необходимой конфигурации проводников. Данный подход способствует уменьшению массогабаритных характеристик устройств защиты по сравнению с

устройствами, полученными на основе объединения двух и более обособленных структур в единую конструкцию (рисунок 2.1).

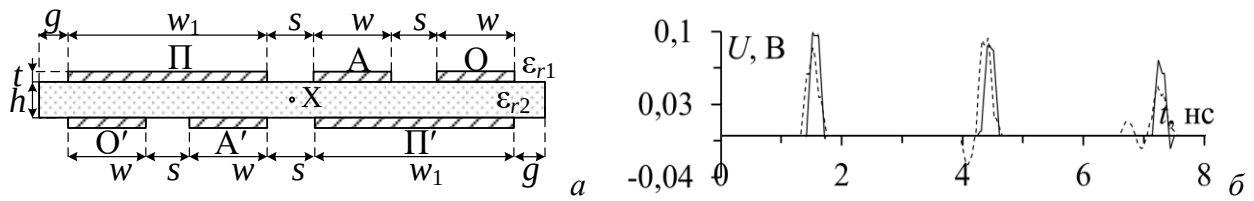


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение (а) и формы напряжения на выходе (б) устройства защиты на основе полосковой структуры

Результатом является увеличение уровня затухания помеховых сигналов в синфазном и дифференциальном режимах воздействия за счет усиления связей между активными и пассивными проводниками, увеличения ширины пассивных проводников и расположением их на обеих сторонах диэлектрической подложки, применением комбинации оконечных нагрузок на ближнем и дальнем концах пассивных проводников, а также сохранением центральной симметрии поперечного сечения. Максимальное напряжение импульсов на выходе устройства защиты и вносимое затухание составило 99 мВ и 14,05 дБ для синфазного и 93 мВ и 14,54 дБ для дифференциального режимов соответственно.

3. Устройства защиты на основе 6- и 8- проводных структур с модальным разложением, работающие в синфазном и дифференциальном режимах

В подразделе 3.1 рассматриваются устройства защиты на основе полосковых линий передачи. Выполнен выбор наилучших структур поперечного сечения устройства защиты, обеспечивающих защиту от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах. В результате предварительного моделирования выбраны 2 поперечных сечения полосковых устройств (рисунок 3.1).

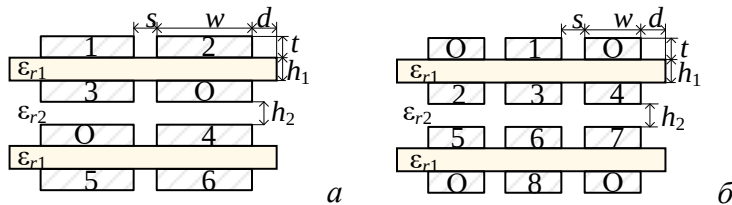


Рисунок 3.1 – Поперечные сечения 6-(а) и 8-проводного (б) устройств защиты

Таблица 3.1 – Значения $U_{\max}$ и K

Вар-нт нагрузок	$U_{\max CM}$, мВ	$U_{\max DM}$, мВ	K_{CM}	K_{DM}	$U_{\max CM}$, мВ	$U_{\max DM}$, мВ	K_{CM}	K_{DM}
	6-проводная				8-проводная			
R – R	195	216	2,56	2,31	148	286	3,38	1,74
XX – XX	458	477	1,09	1,04	375	469	1,33	1,06
K3 – K3	251	246	1,99	2,03	362	252	1,38	1,98
XX – K3	114	113	4,38	4,42	105	201	4,76	2,48
R – K3	147	141	3,4	3,54	217	140	2,3	3,57
R – XX	300	322	1,6	1,55	223	259	2,24	1,93

турах, получено, что оптимально подключение E_{r1} к проводнику 1, а E_{r2} – к проводнику 6: для 6-проводной $U_{\max CM, DM} = 113$ мВ, для 8-проводной $U_{\max CM} = 86$ мВ, $U_{\max DM} = 142$ мВ (рисунок 3.2, 3.3).

В подразделе 3.2 произведен выбор схемных моделей и оконечных нагрузок пассивных проводников. Результаты моделирования показали, что для 6- и 8-проводных структур оптимален вариант XX-K3 на ближнем и дальнем концах пассивных проводников, соответственно, т.к. в таком случае амплитуды $U_{\max}$ минимальны, а коэффициенты ослабления K максимальны (таблица 3.1). Для в синфазного (—) и дифференциального (--) режимов в 6- и 8-проводной струк-

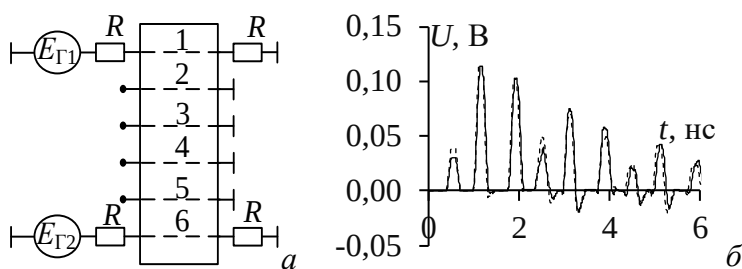


Рисунок 3.2 – Схема соединений (а) и формы напряжения (б) 6-проводного устройства защиты

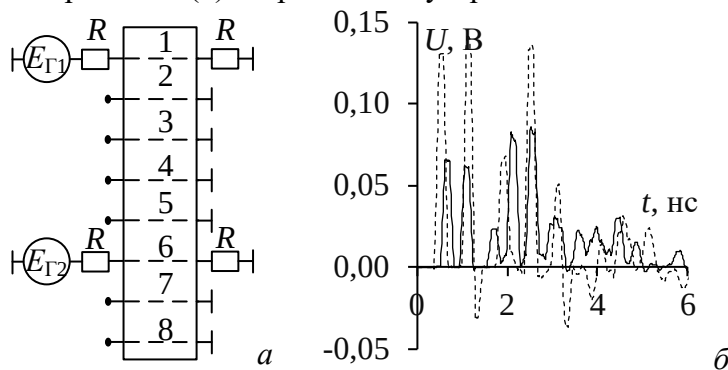


Рисунок 3.3 – Схема соединений (а) и формы напряжения (б) 8-проводного устройства защиты

валы обеих структур определяются толщиной диэлектрика. **В подразделе 3.4** представлены результаты квазистатического моделирования 6- и 8-проводной структур, при разных диэлектрических подложках и значениях ϵ_r используемого диэлектрика: наилучшим материалом выбран FSD1020T с $\epsilon_r=10,2$, толщиной 0,254 мм. **В подразделе 3.5** приведены результаты оптимизации параметров поперечного сечения защитных устройств с помощью генетического алгоритма (ГА) по амплитудному (минимизация амплитуды импульсов) и временному (максимизация разности задержек мод) критериям. В результате для 6-проводной структуры $w = 26$ мм, $s = 3,5$ мм, $d = 1$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 5$ мм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_{r1} = 10,2$, $\epsilon_{r2} = 1$, $l = 0,1$ м, а для 8-проводной – $w = 25$ мм, $s = 8$ мм, $d = 1$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 2,5$ мм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_{r1} = 10,2$, $\epsilon_{r2} = 1$, $l = 0,1$ м. **В подразделе 3.6** вычислены матрицы коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции, а также матрицы характеристического импеданса и погонных задержек мод оптимизированных 6- и 8-проводной структуры в ПО TUSUR.EMC с помощью метода моментов. **В подразделе 3.7** представлены результаты получения временных откликов и $|S_{21}|$ для 6- и 8-проводной структур. Частотные и временные характеристики оптимизированных устройств защиты получены квазистатического моделирования в ПО ADS по вычисленным в ПО TUSUR.EMC матрицам **L** и **C**. **В подразделе 3.8** приведены результаты квазистатического моделирования для оценки влияния экранирующего корпуса на K и погонные задержки 6- и 8-проводной структур. **В подразделе 3.9** представлены результаты квазистатического моделирования влияния расположения каскадов 6- и 8-проводной структур на K и погонные задержки. **В подразделе 3.10** приведены результаты разработки и исследования технических решений прототипов 6- и 8-проводных устройств защиты РЭС от СКИ, работающих в дифференциальном и

В подразделе 3.3 приведены результаты вычисления K в синфазном и дифференциальном режимах, погонные задержки мод и временные интервалы при разных значениях параметров поперечного сечения 6- и 8-проводной структур. Наибольшее влияние на коэффициент затухания оказывают ширина проводника и толщина диэлектрика, расстояние между проводниками и толщина воздушного зазора – слабое влияние, а расстояние между проводниками и диэлектриком и толщина проводника не влияют. Погонные задержки и временные интервалы

синфазном режимах. Реализованы прототипы 6- и 8-проводных устройств защиты (рисунок 3.4).

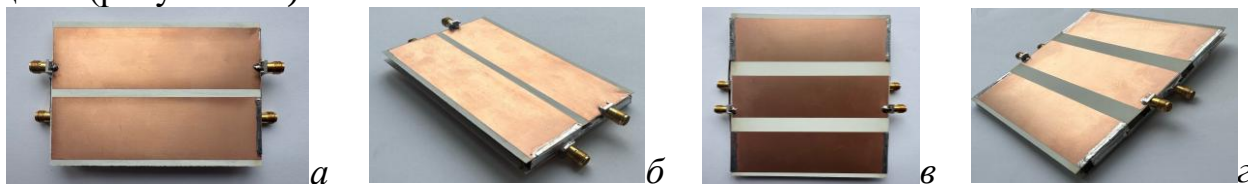


Рисунок 3.4 – Прототипы устройств защиты: 6-проводной структуры, вид сверху (а), изометрия (б); 8-проводной структуры, вид сверху (в), изометрия (г)

Получены частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипов устройств защиты при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (···) (рисунок 3.5, 3.6).

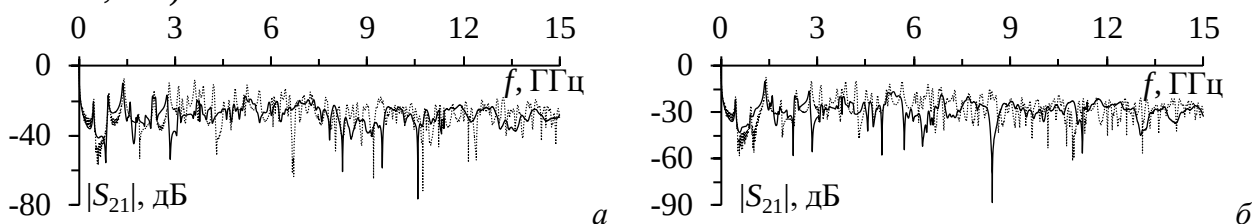


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ на выходе 6-проводной структуры в синфазном (а) и дифференциальном (б) режимах

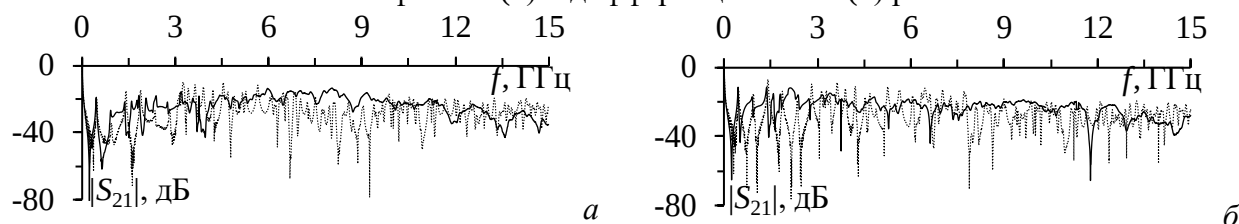


Рисунок 3.6 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ на выходе 8-проводной структуры в синфазном (а) и дифференциальном (б) режимах

При моделировании частота среза по уровню -3 дБ для 6-проводной структуры составила 6 МГц в обоих режимах, а для 8-проводной 6,1 МГц в обоих режимах. Получены результаты сравнительного анализа временных характеристик, полученных при эксперименте и электродинамическом моделировании (рисунок 3.7, 3.8).

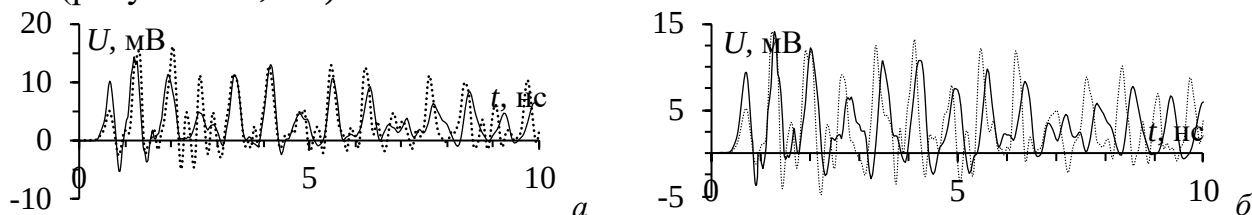


Рисунок 3.7 – Формы напряжения на выходе 6-проводной структуры в синфазном (а) и дифференциальном (б) режимах

На выходе 6-проводной структуры в дифференциальном режиме при эксперименте и электродинамическом моделировании, получены максимальные амплитуды и вносимое затухание, которые составили: $U_{\max DM \text{эксп}}$ 14 мВ и 31 дБ и $U_{\max DM \text{мод}}$ 14,1 мВ и 31 дБ, соответственно. Отличие максимальной амплитуды составило 1 %. В синфазном режиме при эксперименте и электродинамическом моделировании $U_{\max CM \text{эксп}}$ 14,4 мВ и 30,8 дБ и $U_{\max CM \text{мод}}$ 16 мВ и 29,8 дБ, соответственно. Отличие максимальной амплитуды составило 10 %.

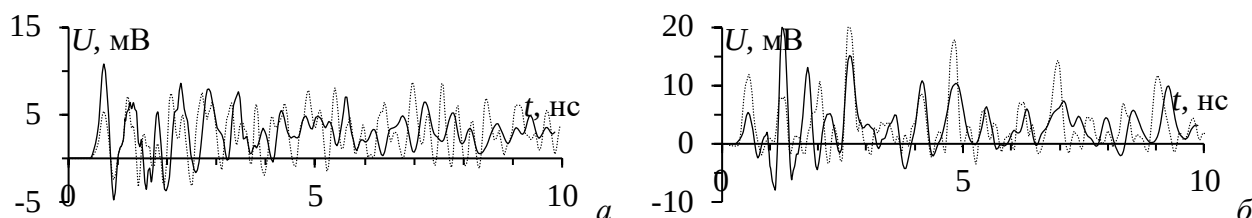


Рисунок 3.8 – Формы напряжения на выходе 8-проводной структуры в синфазном (а) и дифференциальном (б) режимах

На выходе 8-структуры в дифференциальном режиме при эксперименте и электродинамическом моделировании, получены максимальные амплитуды и вносимое затухание, которые составили: $U_{\max DM_{\text{эксп}}} = 19,8$ мВ и 28 дБ и $U_{\max DM_{\text{мод}}} = 21$ мВ и 27,5 дБ, соответственно. Отличие максимальной амплитуды составило 5,7 %. В синфазном режиме при эксперименте и электродинамическом моделировании $U_{\max CM_{\text{эксп}}} = 10,8$ мВ и 33,3 дБ и $U_{\max CM_{\text{мод}}} = 9$ мВ и 34,8 дБ, соответственно. Отличие максимальной амплитуды составило 16,6 %.

4. Методика проектирования планарного гибридного устройства защиты от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах

В подразделе 4.1 представлены результаты разработки и исследования планарного устройства защиты РЭС от СКИ на основе последовательного соединения полосковой структуры с модальным разложением (ПСМР) и пассивного помехоподавляющего фильтра (ПФ). Получены численные значения планарных элементов ПФ (таблица 4.1): наибольшую индуктивность обеспечивает квадратная планарная катушка, по причине большего коэффициента заполнения. Наблюдается нелинейная зависимость номинала планарной индуктивности от длины стороны: увеличение длины стороны с 10 до 20 мм ведет к увеличению емкости в 8 раз, дальнейшее увеличение длины ведет к пропорциональному увеличению емкости не более, чем в 2,35...3,33 раз. Для достижения максимально возможной емкости планарных конденсаторов ПФ, исходя из формулы для определения емкости плоского конденсатора, изолирующий материал должен обладать большим показателем диэлектрической проницаемости ϵ_r при наименьшей толщине h .

Таблица 4.1 – Параметры планарных элементов

Стор. площ., мм	Внут. диам., мм	Вн. диам., мм	Вит -ки	Форма индуктивности				C, пФ
				4-уг.	Круг.	6-уг.	8-уг.	
				L, мкГн				
10	3,2	10	9	0,65	0,54	0,52	0,53	35,5
20	3,6	20	21	5,26	4,40	4,17	4,24	142,2
30	3,2	30	34	17,52	14,60	13,76	14,04	320
40	3,6	40	46	41,16	34,44	32,24	32,90	568
60	3,6	60	71	137	114,70	106,9	109,3	1280
80	3,6	80	96	322	269,8	251,2	256,6	2275

Из графика видно, что зависимость емкости планарных конденсаторов ПФ от длины стороны нелинейна: увеличение длины стороны с 10 до 20 мм ведет к увеличению емкости в 4 раза, однако далее емкости увеличиваются не более, чем в 1,7...2,25 раз. Соотношение занимаемых площадей в зависимости от длины стороны лежит в аналогичных пределах. На рисунке 4.1 представлены результаты вычисления временного и частотного откликов на выходе ПФ в синфазном (—) и дифференциальном (---) режимах.

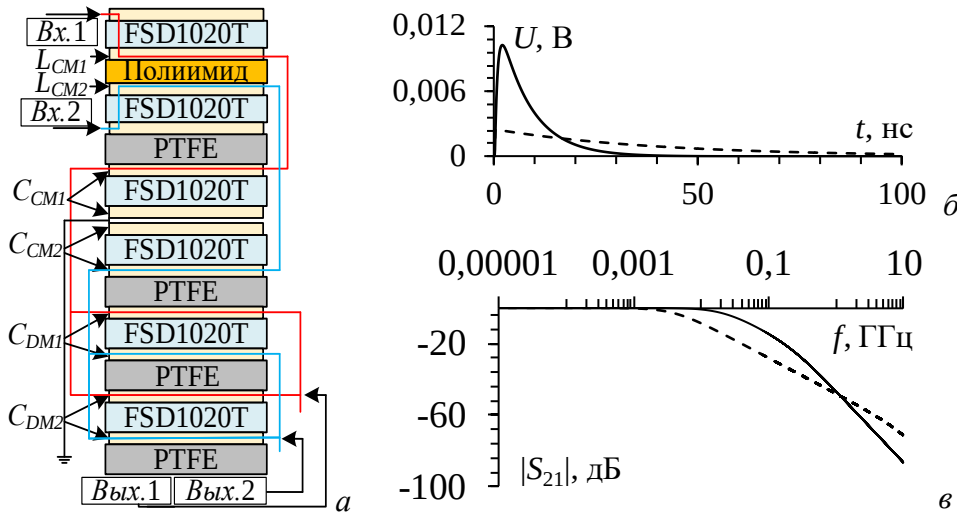


Рисунок 4.1 – Топология слоев (а), формы напряжения (б) и частотные зависимости (в) $|S_{21}|$ планарного пассивного ПФ

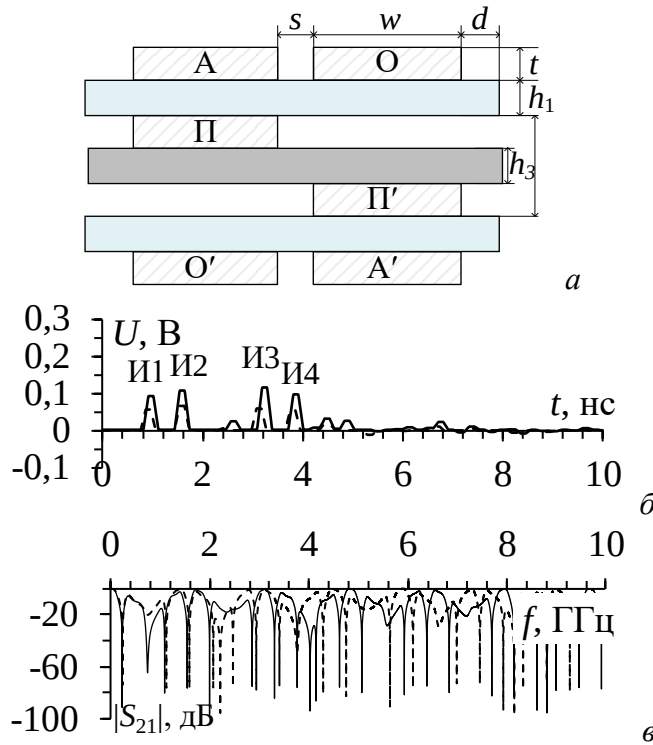


Рисунок 4.2 – Поперечное сечение ПСМР (а), формы напряжения на выходе (б) и частотные зависимости $|S_{21}|$ (в) ПСМР

ответственно, частоты среза f_c ПСМР – 96,8 МГц и 107,9 МГц соответственно. Для определения последовательности расположения устройств защиты подлежащих гибридизации, рассмотрено две возможные конфигурации включения: ПСМР + ПФ и ПФ + ПСМР (рисунок 4.3). В качестве входного воздействия использован типовой СКИ трапецевидной формы, общей длительностью 300 пс. Амплитуды э.д.с. в синфазном режиме $E_{Г1} = E_{Г2} = 1$ В, а в дифференциальном – $E_{Г1} = 0,5$ В, $E_{Г2} = -0,5$ В. Получены временные и частотные отклики на выходе рассматриваемых конфигурации (рисунок 4.4).

Максимальная амплитуда напряжения $U_{\max}$ на выходе ПФ составила 2,5 и 10,2 мВ в синфазном и дифференциальном режимах соответственно.

Уровни K составили 33,8 и 46 дБ в синфазном и дифференциальном режимах, частоты среза f_c – 20,7 и 4 МГц, крутизна спада – 20 и 40 дБ/дек соответственно, что эквивалентно 1 и 2 порядку фильтров. В качестве полоскового устройства защиты использовано ПСМР с лицевой связью (рисунок 4.2а). Устройство выполнено на двух диэлектрических подложках FSD1020T, разделенных PTFE пластиной. Получены результаты вычисления временного и частотного откликов на выходе ПСМР в синфазном (—) и дифференциальном (---) режимах (рисунок 4.2б, в). Максимальная амплитуда на выходе звена ПСМР в синфазном режиме определяется импульсом И4 и составляет 116 мВ, в дифференциальном – импульсом И2 и 130 мВ соот-

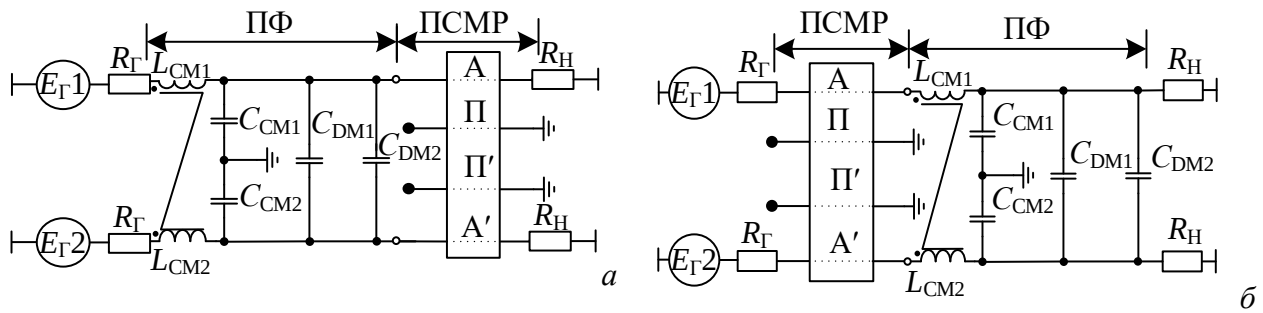


Рисунок 4.3 – Схемы электрические принципиальные гибридного устройства защиты: ПФ + ПСМР (а), ПСМР + ПФ (б)

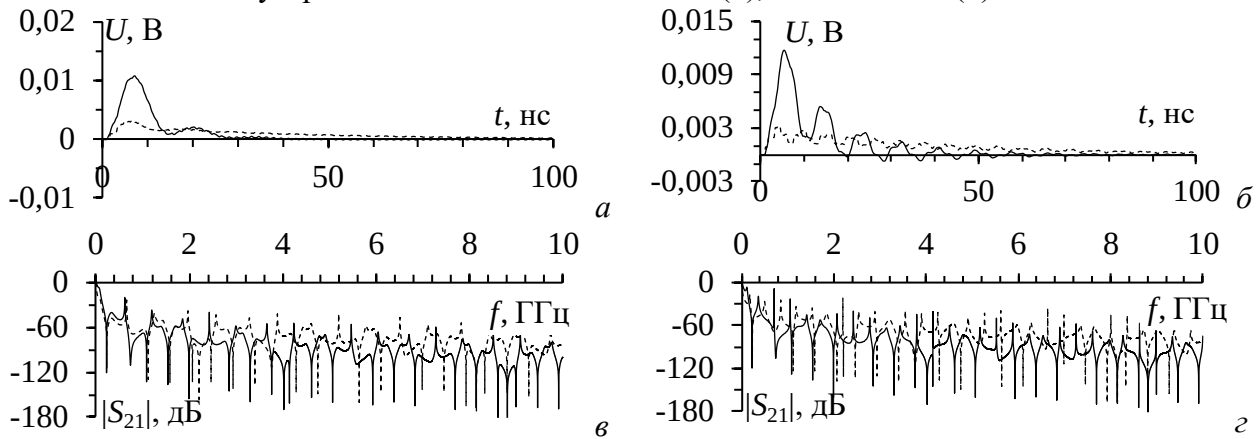


Рисунок 4.4 – $|S_{21}|$ и формы напряжения на выходе гибридного устройства защиты в синфазном (—) и дифференциальном (---) режимах для конфигураций: ПФ + ПСМР (а, в) ПСМР + ПФ (б, г)

На основе анализа частотно-временных зависимостей, выбрана конфигурация ПСМР + ПФ: несмотря на то, что максимальные значения амплитуды импульсов на выходе устройства на 8,3 % в синфазном и на 6,6 % в дифференциальном режимах выше, чем в варианте ПФ + ПСМР, такая конфигурация обладает на 6,3 % более низкой частотой среза в синфазном режиме. Частоты среза в дифференциальном режиме для обеих схем включения равны 3,9 МГц. Расположение ПСМР на входе гибридного устройства защиты, позволяет раскладывать помеховый сигнал на последовательность импульсов с меньшей амплитудой, при этом пассивный ПФ, при помощи LC компонентов с распределенными параметрами, обеспечивает дополнительное ослабление за счет частотной селекции. В подразделе 4.2 представлена методика проектирования планарных гибридных устройств защиты.

1. Формулирование требований, предъявляемых к гибричному устройству защиты: возможность ослабления СКИ одновременно в синфазном и дифференциальном режимах, оценка использования компонентов с распределенными или сосредоточенными параметрами, учет технологического процесса, а также массогабаритные ограничения.

2. Выбор и обоснование топологии гибридного устройства защиты: выполняется анализ возможностей гибридизации схемотехнических решений и применение методов улучшения ЭМС.

3. Проработка конструктивного исполнения устройства защиты: формируются возможности размещения компонентов и их соединения, а также

производится учет их взаимовлияния. Выбор и обоснование требований к используемым материалам, исходя из электрических параметров и техпроцесса.

4. Проектирование первого защитного устройства входящего в состав гибридного устройства защиты: выполняется разработка и проектирование ПСМР – выбор связи между проводниками; выбор параметров поперечного сечения и длины; расчет матриц погонных параметров и анализ модальных характеристик; получение временного отклика.

5. Проектирование второго устройства защиты входящего в состав гибридного устройства защиты: аналогично ПСМР, выполняется разработка и проектирование пассивного ПФ – выбор структуры планарных LC -элементов, по критериям максимизации номиналов и минимизации занимаемой площади; разработка многослойной структуры, схемы связей и соединений.

6. Объединение звеньев: коррекция геометрии и номиналов элементов гибридного устройства защиты, для достижения минимальных массогабаритных показателей и максимального уровня ослабления СКИ.

7. Верификация результатов: проверка характеристик на соответствие требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования

1. Разработано и запатентовано устройство защиты на основе полосковой структуры с лицевой связью, центрально-симметричным расположением проводников на общем диэлектрическом основании, работающее в синфазном и дифференциальном режимах. Максимальное напряжение импульсов на выходе и вносимое затухание составили 99 мВ и 14,05 дБ для синфазного и 93 мВ и 14,54 дБ для дифференциального режимов соответственно.

2. Разработаны и исследованы характеристики устройств защиты на основе 6- и 8-проводных структур. Экспериментально определены значения K в обоих режимах: для 6-проводной структуры – в дифференциальном режиме 35,7, в синфазном – 34,7. Для 8-проводной структуры 25,2 и 46,3 соответственно. Частоты среза для 6-проводной структуры 6 МГц, для 8-проводной – 6,1 МГц в обоих режимах.

3. Разработано и запатентовано устройство защиты на основе 6-проводной полосковой структуры, защищающее от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах.

4. Разработано планарное гибридное устройства защиты на основе пассивного ПФ и ПСМР. Устройство защиты в варианте ПСМР + ПФ обеспечивает амплитуды импульсов на выходе и вносимое затухание 11,7 и 32,6 дБ в синфазном и 1,6 мВ и 49,8 дБ в дифференциальном режимах, что на 8,3 и 6,6 % выше, чем у варианта ПФ + ПСМР. Частота среза в дифференциальном режиме для обоих вариантов равна 3,9 МГц, при этом в синфазном режиме – на 6,3% меньше и равна 14,3 МГц.

Рекомендации

1. При проектировании устройств защиты на основе связанных линий передачи рекомендуется использовать оконечные нагрузки пассивных линий в режимах ХХ на ближнем конце и КЗ на дальнем конце, так как данная конфигурация обеспечивает наибольшие значения вносимого затухания.

2. Для обеспечения стабильности защитных характеристик при переключении и резервировании каналов рекомендуется применять конфигурации с одинаковыми электрическими характеристиками проводников до и после переключения, особенно в случаях, когда требуется сохранение уровней затухания в дифференциальном режиме.

3. Для обеспечения стабильности защитных характеристик при переключении и резервировании каналов рекомендуется применять конфигурации с одинаковыми электрическими характеристиками проводников до и после переключения, особенно в случаях, когда требуется сохранение уровней затухания в дифференциальном режиме.

4. Устройства защиты, работающие в синфазном и дифференциальном режимах, на основе 6- и 8-проводных структур с модальным разложением, оптимальны для защиты цепей питания и низкоскоростных интерфейсов (до 6 МГц) в критически важных отраслях (авиация, космос, энергетика) благодаря высокому ослаблению помех и высокой надежности пассивной конструкции. Выбор между 6- и 8-проводной структурами позволяет сбалансировать требования к ослаблению в разных режимах, массогабаритным показателям и электрической прочности в зависимости от конкретного приложения.

5. Для защиты современной РЭС от кондуктивных помех необходимо использование в составе устройств защиты современных диэлектрических материалов, обладающих повышенной диэлектрической проницаемостью

6. Результаты исследования могут быть применены в образовательном процессе высших учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Оптимизация геометрических параметров поперечного сечения устройств защиты с учетом реальных потерь в проводниках и диэлектриках, а также влияния технологических отклонений при серийном изготовлении печатных плат.

2. Исследование каскадных экранированных устройств защиты с увеличенным числом каскадов и различными соотношениями длин участков для достижения более высоких значений вносимого затухания.

3. Выполнение экспериментальных исследований устройств защиты при воздействии различных типов сверхкоротких импульсов, регламентированных действующими стандартами, с целью уточнения области применимости предложенных технических решений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК по научной специальности 2.2.13 (3)

1. **Лакоза А.М.** Обзор методов модификации магнитных, экранирующих, радиопоглощающих материалов и покрытий / **А.М. Лакоза** // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 4. – С. 196–218.

2. **Лакоза А.М.** Обзор современных устройств фильтрации и защиты от кондуктивных электромагнитных помех в радиоэлектронных системах / **А.М. Лакоза** // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2024. – Т. 27. – № 4. – С. 31–46.

3. Костелецкий В.П. Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах / В.П. Костелецкий, **А.М. Лакоза**, Е.Б. Черникова // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 3. – С. 159–169.

Статья в журнале из перечня ВАК по смежной отрасли (1)

4. Костелецкий В.П. Оптимизация параметров поперечного сечения устройств защиты от сверхкоротких импульсов, работающих в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, Е.Б. Черникова, **А.М. Лакоза** // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 5. – С. 1–23.

Статья в издании из перечня ВАК по смежной специальности (1)

5. Костелецкий В.П. Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, **А.М. Заболоцкий**, **А.М. Лакоза** // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2021. – № 4. – С. 127–133.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus (13)

6. **Lakoza A.M.** Measuring Radiated Emission Levels and EMI Susceptibility of Protection Devices based on Modal Filtering / **A.M. Lakoza**, V.P. Kosteletsky, M.E. Komnatnov // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Novosibirsk, Russia, 2022. – P. 214–217.

7. Morozov S.R. Quasi-Static Simulation of a Double-Sided PCB with Triple Modal Reservation / S.R. Morozov, **A.M. Lakoza** // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, Russia, 2022. – P. 324–329.

8. **Lakoza A.M.** The Efficiency of Conductor Placement in Circuits with Single Modal Redundancy in Differential and Common Modes / **A.M. Lakoza**, V.P. Kosteletsky // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Novosibirsk, Russia, 2023. – P. 1210–1214.

9. **Lakoza A.M.** Estimating the Insertion Attenuation under Different Methods of Modal Redundancy in Differential and Common Modes / **A.M. Lakoza**, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, Russia, 2023. – P. 408–412.

10. Nesterenko A.K. Effect of Conductor and Dielectric Arrangement on the Protective Characteristics of Protection Devices in Common and Differential Modes /

A.K. Nesterenko, V.P. Kosteletskii, **A.M. Lakoza** // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – Sochi, Russia, 2024, – P. 720–725.

11. **Lakoza A.M.** Evaluation of the Efficiency of Conductor Placement Under Different Types of Pulse Interference in Differential and Common Modes / **A.M. Lakoza**, V.P. Kosteletskii // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russia, 2024, – P. 392–397.

12. **Lakoza A.M.** Influence of Conductor Arrangement and Termination Loads on Modal Redundancy Efficiency in a Four-Conductor Modal Filter / **A.M. Lakoza**, V.P. Kosteletskii, E.B. Chernikova // 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russia, 2024, – P. 813–818.

13. **Lakoza A.M.** Influence of Cross-Section Geometrical Parameters on the Structures Characteristics Protecting in Differential and Common Modes / **A.M. Lakoza**, V.P. Kosteletskii, E.B. Chernikova // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – Novosibirsk, Russia, 2024. – P. 180–184.

14. Kosteletskii V.P. The Influence of Shielding Enclosure on the Characteristics of Protection Devices Operating in Differential and Common Modes / V.P. Kosteletskii, **A.M. Lakoza**, E.B. Chernikova // 2025 International Russian Smart Industry Conf. (SmartIndustryCon). – Sochi, Russia, 2025. – P. 832–836.

15. Kosteletskii V.P. Evaluating the Characteristics of Protective Devices Based on Cascade Arrangement of 8-conductor Strip Structures / V.P. Kosteletskii, **A.M. Lakoza**, A.M. Zabolotsky // 2025 International Russian Automation Conf. (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2025). – P. 874–879.

16. Kosteletskii V.P. Evaluating the Effect of Cascade Arrangement on the Characteristics of the Protection Devices Based on 6-Conductor Structure with Modal Decomposition / V.P. Kosteletskii, **A.M. Lakoza**, E.B. Chernikova // 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2025. – P. 703–707.

17. Kosteletskii V.P. Evaluating the Characteristics of Protective Devices Based on Cascade Arrangement of 8-conductor Strip Structures / V.P. Kosteletskii, **A.M. Lakoza**, A.M. Zabolotsky // 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2025). – P. 874–879.

18. Kosteletskii V.P. Analysis of the Effect of Dielectric Substrate Material on the Performance of Multiconductor Stripline Protection Devices / V.P. Kosteletskii, **A.M. Lakoza** // 2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russian Federation, 2025. – P. 1-5.

Доклады в трудах отечественной конференции (12)

19. **Лакоза А.М.** Исследование характеристик помехоподавляющих фильтров с различной компоновкой индуктивных элементов / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2019. – № 1–2. – С. 45–48.

20. **Лакоза А.М.** Исследование характеристик гибридного помехоподавляющего дросселя / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2019. – № 1–2. – С. 36–38.

21. **Лакоза А.М.** Исследование частотных характеристик фильтра с комбинированным дросселем / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №1–1. – С. 254–257.

22. **Лакоза А.М.** Экспериментальное исследование комбинированного дросселя для фильтра подавления синфазных и дифференциальных помех / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2020. – № 1–1. – С. 301–303.

24. **Лакоза А.М.** Вычисление временных откликов экранированного модального фильтра из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах на воздействие типовых сверхкоротких импульсов / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2021. – № 1–2. – С. 47–49.

24. **Лакоза А.М.** Влияние расположения проводников модального фильтра на ослабление сверхкороткого импульса в синфазном и дифференциальном режимах / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-27-2021): Доклады (материалы) 27-й международной научно-практической конференции. – Томск. – 2021. – С. 134–139.

25. **Лакоза А.М.** Разработка печатной платы с трехкратным модальным резервированием с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов / **А.М. Лакоза**, А.В. Медведев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2022. – № 1–1. – С. 224–227.

26. **Лакоза А.М.** Исследование электрических характеристик Mn-Zn-ферритового порошка, модифицированного путем электронно-лучевой эмиссии / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1–1. – С. 294–296.

27. **Lakoza A.M.** Electron beam modification of characteristics of Mn-Zn-ferri-rite powder / **A.M. Lakoza**, V. P.Kosteletsky // TUSUR Scientific Session: Collection of selected papers. – 2023. – No. 1–3. – P. 306–310.

28. **Лакоза А.М.** Исследование способов модального резервирования в синфазном и дифференциальном режимах / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 26-й Всероссийской молодежной научной конференции. – Ульяновск. – 2023. – С. 176–178.

29. **Лакоза А.М.** Гибридное устройство защиты от сверхкоротких импульсов на основе планарных элементов / **А.М. Лакоза** // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-31-2025): Доклады (материалы) 31-й международной научно-практической конференции. – Томск. – 2025. – С. 73–78.

30. **Лакоза А.М.** Экспериментальное исследование комбинированного дросселя для фильтра подавления синфазных и дифференциальных помех / **А.М. Лакоза**, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи: Тезисы докладов II Межрегиональной научной конференции, Тула, 05–06 ноября 2020 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2020. – С. 25–26.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (3)

31. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2023683460. Вычисление характеристик полосковой структуры с лицевой связью, защищающей от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах. Авторы: Костелецкий В.П., **Лакоза А.М.**, Заболоцкий А.М., Нестеренко А.К. Заявка № 2023682300. Дата поступления 27.10.2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.11.2023 г.

32. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2024683576. Вычисление характеристик 8-проводной полосковой структуры, защищающей от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах. Авторы: Костелецкий В.П., **Лакоза А.М.**, Нестеренко А.К. Заявка № 2024682354. Дата поступления 28.09.2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.10.2024 г.

33. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2024683551. Вычисление характеристик 6-проводной полосковой структуры, защищающей от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах. Авторы: Костелецкий В.П., **Лакоза А.М.**, Нестеренко А.К. Заявка № 2024682413. Дата поступления 28.09.2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.10.2024 г.

Патенты на изобретение (2)

34. Патент на изобретение №2823269 С1 Российская Федерация. Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах / Костелецкий В.П., **Лакоза А.М.**, Заболоцкий А.М., Нестеренко А.К. – Заявка № 2024101988; заявлен 27.01.2024; опубликован 22.07.2024, Бюл. №21.

35. Патент на изобретение №2848022 С1 Российская Федерация. 6-проводная полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах / Костелецкий В.П., **Лакоза А.М.**, Нестеренко А.К. – Заявка № 2025102162; заявлен 01.02.2025; опубликован 16.10.2025, Бюл. №29.