

На правах рукописи



Жечев Евгений

**Анализ и экспериментальное исследование
частотных и временных характеристик
полосковых структур с модальной фильтрацией**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

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,
ФГБОУ ВО «ТУСУР»

Официальные оппоненты – **Гизатуллин Зиннур Марселевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ»

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

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится 27 декабря 2022 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/ftycup0w>

Автореферат разослан ____ ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для обеспечения функциональной безопасности и высокой производительности радиоэлектронных устройств (РЭУ) необходимо соблюдать жесткие требования электромагнитной совместимости (ЭМС). Их невыполнение приводит к функциональным сбоям и повреждениям как отдельных элементов, так и систем в целом. Вопросы ЭМС проявляются на всех структурных уровнях вычислительной техники: от межсоединений и интегральных схем (ИС) на печатной плате (ПП) до систем управления и обработки данных космических аппаратов (КА). Из-за роста быстродействия приемо-передающих устройств и повышения плотности монтажа их элементов, современные РЭУ становятся более восприимчивыми к воздействию внешних и внутренних электромагнитных помех (ЭМП). Они распространяются по цепям питания, линиям передачи данных и системам заземления. Особо опасными являются кондуктивные сверхширокополосные (СШП) помехи, которые имеют высокое напряжение, малую длительность и широкий спектр. Несмотря на небольшую энергию таких ЭМП, их влияние на типовые РЭУ может быть значительным. Классические устройства защиты РЭУ от помех обладают рядом существенных недостатков: низкие быстродействие и эксплуатационные характеристики, большие масса и габариты. Поэтому разработка эффективных средств защиты РЭУ актуальна.

Степень разработанности темы. Многие публикации последних лет посвящены защите от мощных ЭМП. Известными зарубежными исследователями в этой области являются Backstrom M., Brauer F., Ericsson J., Haase H., Haseborg J., Hoad R., Klunder C., Krzikalla R., Lambourne A., Mansson D., Montano R., Mora N., Nilsson T., Nitsch J., Pignari S., Rachidi F., Radasky W., Sabath F., Weber T., Wendt D., Wraight A. и др. Российские ученые также активно исследовали ЭМС РЭУ: Акбашев Б.Б., Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю., Мырова Л.О., Степанов П.В., Сухоруков С.А. занимались анализом стойкости различных электронных устройств и систем к электромагнитным воздействиям; Петровский В.И. решал задачи в области обеспечения информационной безопасности и ЭМС технических устройств; Борисов Р.К., Лоборев В., Парфенов Ю.В., Петров С.Р., Фортон В.Е. исследовали вопросы, связанные с анализом влияния ЭМП в цепях питания; Гизатуллин З.М., Киричек Р., Чермошенцев С.Ф. анализировали влияние импульсов малой длительности; Малютин Н.Д., Семенов Э.В., Сычев А.Н. исследовали связанные линии передачи; Газизов Т.Р. и Заболоцкий А.М. исследовали устройства для защиты РЭУ от СШП помех на основе модальной фильтрации. Главное преимущество последних состоит в том, что они могут не требовать отдельного устройства, а вместо этого используются специальные трассировка и компоновка существующих межсоединений ПП, обеспечивающие защиту от СШП помех. Между тем исследовано ограниченное число возможных конфигураций таких устройств защиты и выявлены не все особенности разложения кондуктивных СШП помех.

Цель работы – выполнить ряд новых исследований частотных и временных характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией.

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

1. Выполнить обзор источников мощных преднамеренных электромагнитных помех и способов защиты от них.

2. Исследовать возможности улучшения характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией.

3. Исследовать структуры с модальным резервированием на основе зеркально-симметричных структур.

4. Выполнить экспериментальное исследование устройств защиты электрических цепей от сверхширокополосных помех.

Научная новизна

1. Впервые предложена экспериментально-расчетная методика анализа структур с модальной фильтрацией, включающая в себя измерения S -параметров в частотном диапазоне, переход во временную область для вычисления откликов на воздействие сверхширокополосных помех и оценку уменьшения их опасности на основе N -норм.

2. Предложен подход к улучшению характеристик модальных фильтров, отличающийся соединением опорных проводников между собой только на концах и использованием четвертьволновых резонаторов и широкополосных радиопоглощающих материалов.

3. Предложен способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием на четырехслойной печатной плате, отличающийся тем, что опорный проводник выполнен в виде двух проложенных друг под другом проводников внутри диэлектрической подложки и закороченных между собой только на концах, так что проводники резервируемой и резервной цепей вместе с дополнительным опорным проводником образуют пятипроводную связанную линию передачи, а радиоэлектронные компоненты размещаются на внешних сторонах печатной платы (*патент на изобретение*).

4. Предложен способ трассировки двух микрополосковых линий передачи, отличающийся контролируемым увеличением электромагнитной связи между ними до допустимого уровня перекрестных наводок от полезного сигнала и использованием модальных искажений для защиты от сверхширокополосных помех.

Теоретическая значимость

1. Изучены особенности влияния параметров поперечного сечения на временные отклики зеркально-симметричных структур со скрытыми металлизированными отверстиями и различными оконечными нагрузками на ближнем и дальнем концах.

2. Изучены температурные зависимости характеристик зеркально-симметричного модального фильтра.

3. Проведены оценка ослабления сверхширокополосных помех в структурах с однократным и трехкратным модальным резервированием и систематизация способов многократного модального резервирования на основе симметричных структур.

4. Изучено влияние характеристик и параметров симметричных структур с модальной фильтрацией на целостность полезного сигнала.

5. Применительно к проблематике диссертации результативно использован подход к анализу сверхширокополосных помех на основе N -норм.

Практическая значимость

1. Разработан прототип модального фильтра с широкополосным радиопоглощающим материалом для экспериментальных исследований модального разложения импульса сверхширокополосной помехи.

2. Представлены рекомендации по проектированию межсоединений печатных плат для защиты электрических цепей от сверхширокополосных помех.

3. Результаты исследования зеркально-симметричного модального фильтра использованы в модуле фильтра Ф100-М1 космического аппарата в АО «ИСС», г. Железногорск (*акт использования РИД*).

4. Экспериментально-расчетная методика анализа частотных и временных характеристик помехоподавляющего фильтра для защиты силовой шины электропитания космического аппарата и результаты моделирования эффективности экранирования корпуса внедрены в АО «ИСС», г. Железногорск (*акт внедрения*).

5. Комплекс технических решений для обеспечения электромагнитной совместимости, основанный на использовании пассивных помехозащитных устройств, внедрен в ООО «ТРЭМ Инновации», г. Томск (*акт внедрения*).

6. Результаты электродинамического анализа структур с однократным и трехкратным модальным резервированием внедрены в учебный процесс бакалавриата по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» ТУСУР, г. Томск (*акт внедрения*).

Методология и методы исследования. В работе использованы компьютерное моделирование методами моментов и конечных разностей во временной области, квазистатический и электродинамический подходы, параметрическая оптимизация генетическим алгоритмом и эвристическим поиском, а также лабораторный эксперимент на базе скалярного и векторного анализаторов цепей и цифрового стробоскопического осциллографа.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная экспериментально-расчетная методика анализа структур с модальной фильтрацией на основе N -норм позволяет оценить уменьшение опасности сверхширокополосных помех, спектр которых находится в частотном диапазоне измеренных S -параметров структур.

2. Применение широкополосного радиопоглощающего материала в двухпроводном и зеркально-симметричном модальных фильтрах дает ослабление сверхширокополосных помех в 17 и 21 раз, а четвертьволновых резонаторов – в 13 и 27 раз, соответственно.

3. Предложенный способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием на четырехслойной печатной плате позволяет, по сравнению с прототипом, упростить изготовление печатной платы и монтаж её компонентов, а также уменьшить восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным помехам.

4. Предложенный способ трассировки двух микрополосковых линий передачи позволяет уменьшить амплитуду распространяющегося по линии длиной 1 м сверхширокополосного импульса общей длительностью 360 пс не менее чем в 4 раза при полосе пропускания не более 340 МГц.

Результаты проведенных исследований соответствуют паспорту специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения по п. 7 – Разработка и исследование методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, включая системы связи и телевидения, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному и ионизирующему излучению, методов разрушения и защиты информации в этих системах.

Достоверность результатов основывается на корректном применении теории линий передачи, согласованности результатов моделирования и эксперимента, использовании современных методик измерения сертифицированными приборами.

Использование результатов

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

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

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

4. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости», проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 г.

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

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

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

8. НИР «Методология многократного модального резервирования цепей на основе зеркально-симметричных структур», грант РФФИ «Аспиранты» 20-37-90098, 2020–2022 г.

9. НИР «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях», проект FEWM-2022-0001, 2022–2023 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.); РНФ (гранты 19-19-00424, 20-19-00446, 22-29-01331); госзадания (проекты №8.9562.2017, 2017–2019 гг., FEWM-2020-0041, 2020, 2021 гг., FEWM-2022-0001, 2022, 2023 гг.); РФФИ (20-37-70020, 19-37-51017, 20-37-90098); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2019 г.; на назначение стипендий Президента и Правительства РФ в 2020, 2021 гг. и Президента ТУСУРа в 2021 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: межд. научно-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2017–2021 гг.; межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2019–2021 гг.; межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2018 г.; межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 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, 2019–2022 гг.

Публикации. Результаты отражены в 62 публикациях (5 без соавторов): 6 статей в журналах из перечня ВАК; 5 статей в журналах из Q1, Q2 WoS или Scopus; 10 статей в журналах, индексируемых в WoS и Scopus; 7 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 28 докладов в трудах других конференций; 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на изобретение. В автореферате приведены 34 основных публикаций.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список источников из 240 наименований, приложение из 16 с. Объем диссертации с приложением – 240 с., в т.ч. 139 рис. и 48 табл.

Личный вклад. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично. Личный вклад состоит в участии на всех этапах исследований и получении основных результатов. Их обработка и интерпретация выполнены совместно с соавторами публикаций. Непосредственный вклад автора состоит в выполнении электродинамического моделирования, разработке прототипов, создании экспериментально-расчетной методики анализа характеристик полосковых структур, проведении экспериментальных исследований и подготовке публикаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Защита радиоэлектронных устройств от мощных преднамеренных сверхширокополосных помех: обзор

В подразделе 1.1 показана актуальность защиты РЭУ от мощных преднамеренных СШП помех, а также приведены источники ЭМП. **В подразделе 1.2** выполнен обзор методов защиты РЭУ от мощных СШП помех на основе модальной фильтрации, приведены описание и применение N -норм. **В подразделе 1.3** сформулированы цель и задачи работы.

2. Улучшение характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией

В подразделе 2.1 представлены результаты экспериментального исследования конструкции 4-слойного зеркально-симметричного (З-С) модального фильтра (МФ) во временной и частотной областях. Выполнено экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭУ от импульса СШП помехи. Рассмотрено влияние скрытых металлизированных отверстий (СМО) в опорном проводнике на характеристики 4-слойного З-С МФ (рисунок 2.1). Изготовлены прототипы без СМО и с ними (расположены через каждые 10 мм). Выполнено экспериментальное исследование частотных и временных характеристик (рисунок 2.2). Измерения в частотной области проводились с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) N9917A, а во временной – с помощью стробоскопического осциллографа DSA8300 и рефлектометрического модуля 80E04. Максимальное отклонение характеристического импеданса Z_0 , полученное для двух вариантов, не превышает 4,52%. Частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ также хорошо согласуются для двух вариантов. По полученным результатам можно сделать вывод, что разделение опорной плоскости не приводит к значительным изменениям

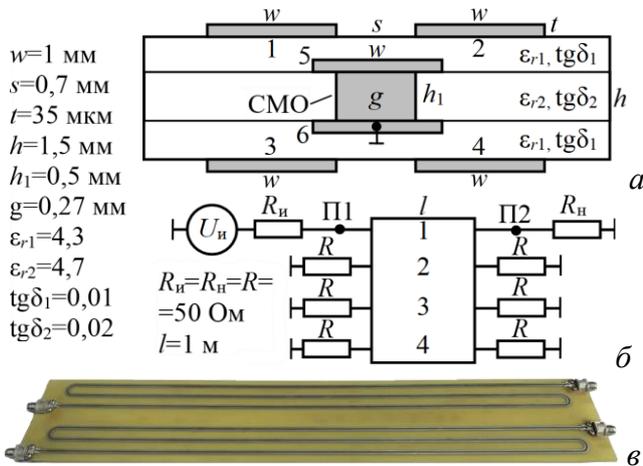


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение (а), схема соединений (б) и прототипы (в) З-С МФ

анализируемых параметров 4-слойного З-С МФ. Поэтому для упрощения разработки и реализации такого рода устройств целесообразно убрать СМО.

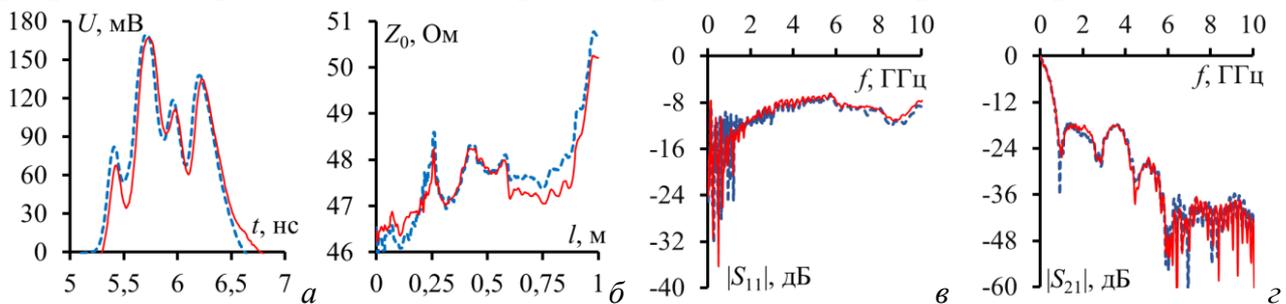


Рисунок 2.2 – Измеренные характеристики прототипа З-С МФ с СМО (---) и без них (—): отклик ($U(t)$) на СШП импульс длительностью 60 пс (а), $Z_0(t)$ (б), $|S_{11}|(f)$ (в) и $|S_{21}|(f)$ (г)

Выполнен квазистатический анализ влияния конечных нагрузок на концах пассивных проводников 4-слойного З-С МФ. Выявлено, что их изменение не приводит к существенному улучшению помехоподавления СШП импульса. Представлены результаты одно- и многокритериальной оптимизации 4-слойного З-С МФ посредством генетического алгоритма (ГА) с использованием температурной модели. Получены закономерности поведения характеристик 4-слойного З-С МФ при температуре от минус 50 до 150°C, а также выявлены и апробированы возможности использования ГА совместно с температурной моделью для оптимизации З-С МФ.

В подразделе 2.2 представлены результаты квазистатического анализа и оптимизации структур 2-проводного МФ и 4-слойного 3-С МФ с четвертьволновыми резонаторами и без них. Схемы включения в Advanced Design System (ADS) 2022 представлены на рисунке 2.3. Смоделированные $|S_{21}|(f)$ для обоих МФ и временные отклики на трапецеидальный импульс (амплитуда ЭДС 1 В, время нарастания, спада и плоской вершины по 50 пс) приведены на рисунке 2.4.

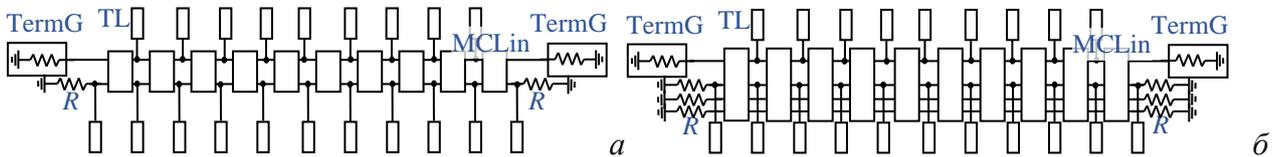


Рисунок 2.3 – Схемы включения 2-проводного МФ (а) и 3-С МФ (б) с резонаторами в ADS

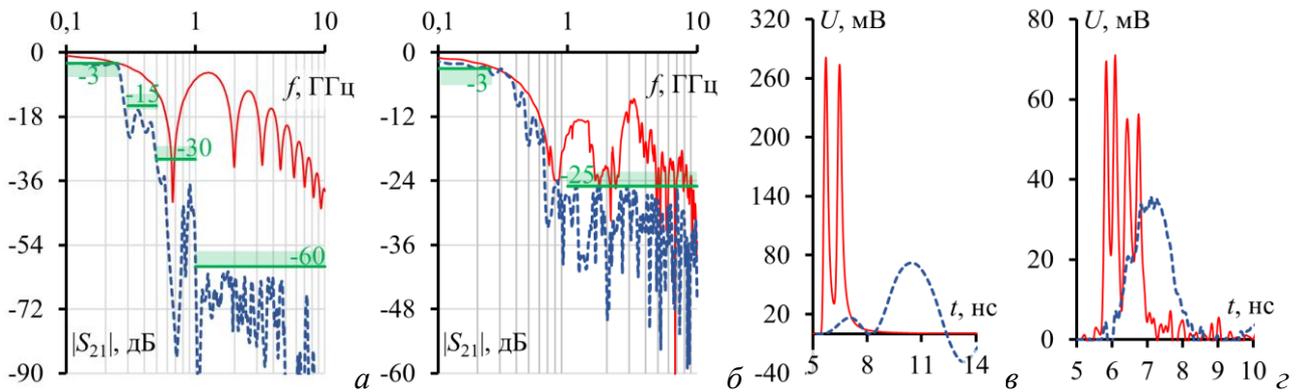


Рисунок 2.4 – Зависимости $|S_{21}|(f)$ (а) и $U(t)$ (в) для 2-проводного МФ и $|S_{21}|(f)$ (б) и $U(t)$ (г) для 3-С МФ без резонаторов (—) и с ними (---)

Таким образом, применение четвертьволновых резонаторов позволило улучшить помехоподавляющие свойства исследуемых устройств защиты. Для 2-проводного МФ, применение резонаторов позволило получить ослабление минус 60 дБ в диапазоне от 1 до 10 ГГц и улучшить ослабление СШП помехи с 3,55 до 13,88 раза, а для 3-С МФ – минус 25 дБ в диапазоне от 1 до 10 ГГц и улучшить ослабление СШП помехи с 14,08 до 27,77 раза.

Представлены результаты исследования и анализа экранированного 4-слойного 3-С МФ с радиопоглощающим материалом (РПМ) и без него. Поперечное сечение такого МФ представлено на рисунке 2.5, а его характеристики – на рисунке 2.6. Применение РПМ уменьшило частоту среза f_c исследуемой структуры со 190 до 40 МГц, а первого резонанса f_r – с 610 до 120 МГц. Для оценки эффективности подавления СШП помех (два гауссовых импульса амплитудой ЭДС 2 В с общей длительностью 0,8 и 2,4 нс) анализировались N -нормы, которые позволяют оценить характер воздействия СШП помех на компоненты и определить возможные виды отказов (таблица 2.1).

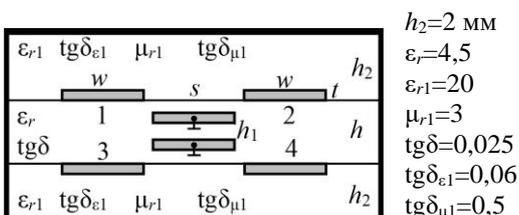


Рисунок 2.5 – Поперечное сечение 3-С МФ в корпусе с РПМ

Таблица 2.1 – Значение N -норм для 3-С МФ с РПМ

СШП	Конфиг.	$N_1 \cdot 10^{-3}$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{12}$	$N_4 \cdot 10^{12}$	$N_5 \cdot 10^6$
0,8 нс	Без МФ	1000	5,32	285	285	14,2
	3-С МФ	88	0,32	136	136	2,95
	3-С МФ (РПМ)	47	0,14	126	126	1,69
2,4 нс	Без МФ	1000	1,77	856	856	24,6
	3-С МФ	229	0,28	396	396	8,09
	3-С МФ (РПМ)	91	1,37	375	375	4,56

В случае N_1 получено дополнительное ослабление в 1,87 раза для СШП импульса длительностью 0,8 нс и 2,51 раза для 2,4 нс. Из-за дисперсии значение N_2 в структуре с РПМ гораздо меньше, чем в исходной. При этом максимальное ослабление СШП помехи составило 38 раз для импульса длительностью 0,8 нс. Применение РПМ уменьшило значение N_5 не менее чем в 1,7 раза для обоих импульсов.

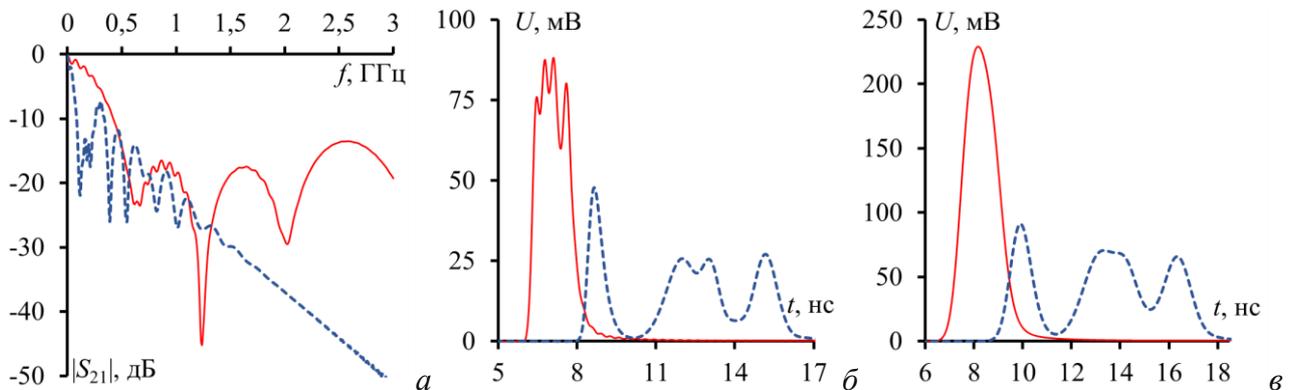


Рисунок 2.6 – Характеристики 3-С МФ без (—) и с (---) РПМ: $|S_{21}|(f)$ (а), $U(t)$ для СШП импульса длительностью 0,8 (б) и 2,4 (в) нс

В подразделе 2.3 выполнен анализ эффективности подавления электростатического разряда (ЭСР) 4-слойным 3-С МФ. Оптимизированные, посредством ГА, конфигурации 3-С МФ обеспечивают разложение пикового выброса ЭСР при меньшей длине l , в сравнении с исходной конфигурацией.

Представлены результаты моделирования и измерения целостности сигнала во временной области для 4-слойного 3-С МФ. Даже при скорости 500 Мбит/с ($f_c=280$ МГц) исследуемый МФ демонстрирует хорошие характеристики сигнала. Средний уровень возвратных потерь в диапазоне от 0 до 500 МГц не превышает минус 10 дБ. Для большинства задач уровни фазового отклонения и амплитудного шума приемлемы, что подтверждает возможность применения 4-слойного 3-С МФ в сигнальных цепях.

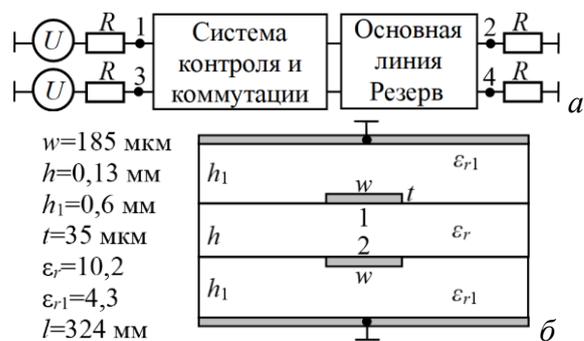
В подразделе 2.4 представлены результаты комплексного исследования 3-С полосковых структур с модальными искажениями, полученные посредством квазистатического и электродинамического видов анализа. Выполнено экспериментальное исследование и получены временные отклики на СШП импульс для 3-С меандровой линии из одного и двух витков. Предложен метод определения комбинационных импульсов с помощью постобработки временных откликов. Экспериментально показано, что исследуемые 3-С структуры значительно ослабляют СШП импульс. Применение меандровой схемы трассировки позволило улучшить помехоподавление исходного 3-С МФ.

3. Анализ структур с модальным резервированием

Модальное резервирование (МР) – способ резервирования электрических соединений, отличающийся использованием электромагнитных связей между резервируемым и резервным проводниками резервируемой и резервной цепей для обеспечения электромагнитной совместимости.

В подразделе 3.1 представлены результаты эксперимента и моделирования структуры с однократным МР до и после отказов типа холостой ход (ХХ)

и короткое замыкание (КЗ) (рисунок 3.1). На рисунке 3.2 представлены $|S_{21}|(f)$ для структуры с однократным МР, а на рисунке 3.3 – её $U(t)$ на воздействие СШП импульса длительностью 0,15 нс. Выявлено, что при электродинамическом моделировании f_c для ХХ и КЗ на одном конце резервного проводника отличаются от схемы в рабочем состоянии на 5,2 и 50%, а значения f_r – на 0,8 и 22%, соответственно. При эксперименте значения f_c для ХХ и КЗ на одном конце резервного проводника отличаются от схемы до отказов на 9,8 и 45%, а f_r – на 1,8 и 19%, соответственно.



В подразделе 3.1 представлены результаты экспериментального исследования и электродинамического моделирования структуры с однократным МР до и после отказов типа холостой ход (ХХ) и короткое замыкание (КЗ) (рисунок 3.1). На рисунке 3.2 представлены $|S_{21}|(f)$ для структуры с однократным МР, а на рисунке 3.3 – её $U(t)$ на воздействие СШП импульса длительностью 0,15 нс. Выявлено, что при электродинамическом моделировании f_c для ХХ и КЗ на одном конце резервного проводника отличаются от схемы до отказов на 5,2 и 50%, а значения f_r – на 0,8 и 22%, соответственно. При эксперименте значения f_c для ХХ и КЗ на одном конце резервного проводника отличаются от схемы до отказов на 9,8 и 45%, а f_r – на 1,8 и 19%, соответственно. Вычисленные N -нормы представлены в таблице 3.1. Они позволяют сделать требуемые оценки.

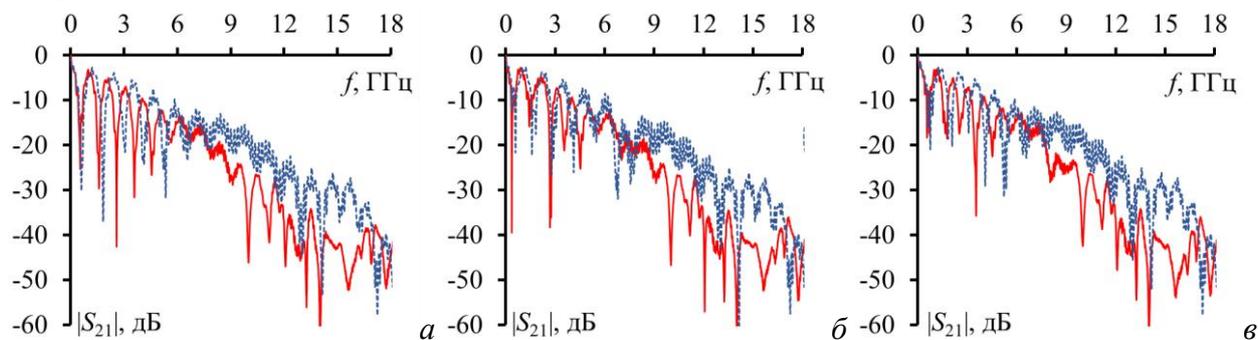


Рисунок 3.2 $|S_{21}|(f)$ для структуры с МР, полученные при электродинамическом моделировании (---) и эксперименте (—) для вариантов 50-50 (а), 50-КЗ (б), 50-ХХ (в)

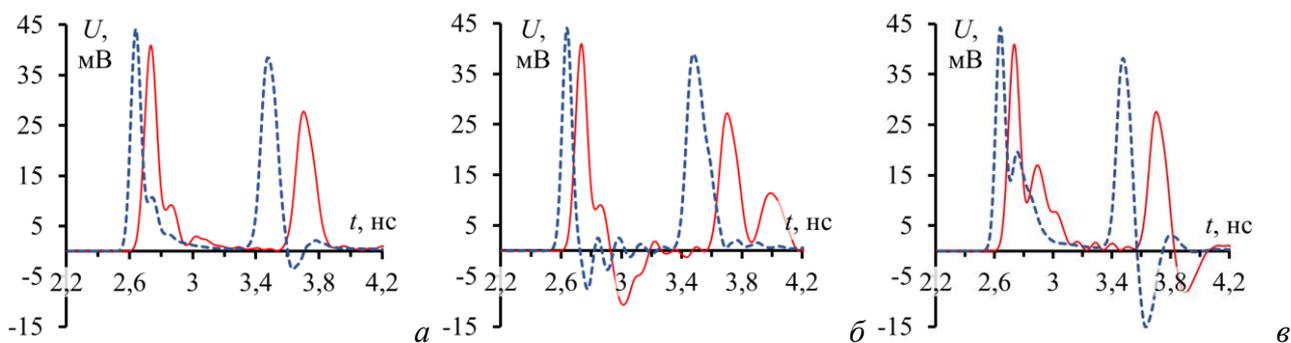


Рисунок 3.3 – $U(t)$ для импульса 0,15 нс, полученные при электродинамическом моделировании (---) и эксперименте (—) для вариантов 50-50 (а), 50-КЗ (б), 50-ХХ (в)

Таблица 3.1 – Значения N -норм для СШП импульсов 0,15 нс и 1,5 нс до и после отказов

Норма	50-50		50-КЗ		50-XX	
	0,15 нс	1,5 нс	0,15 нс	1,5 нс	0,15 нс	1,5 нс
N_1	0,041	0,1	0,041	0,092	0,041	0,121
$N_2 \cdot 10^{-9}$	0,699	36,29	0,698	34,13	0,698	42,35
$N_3 \cdot 10^{12}$	11,44	102,9	12,06	108,5	11,95	107,6
$N_4 \cdot 10^{12}$	17,55	132,4	23,37	174,9	25,35	173,9
$N_5 \cdot 10^6$	0,486	2,6	0,489	2,476	0,542	3,19

Представлены результаты анализа целостности полезного сигнала в структуре с однократным МР до и после отказов (рисунки 3.4 и 3.5). Выявлено, что переданные ранее битовые последовательности могут влиять на фронт и амплитуду последующих импульсов. Это

обусловлено интерференцией падающих и отраженных волн, перекрестными помехами, символьной дисперсией и их различной скоростью распространения мод вдоль структуры. Тем не менее, результаты показали, что в случае отказа полезный сигнал искажается незначительно.

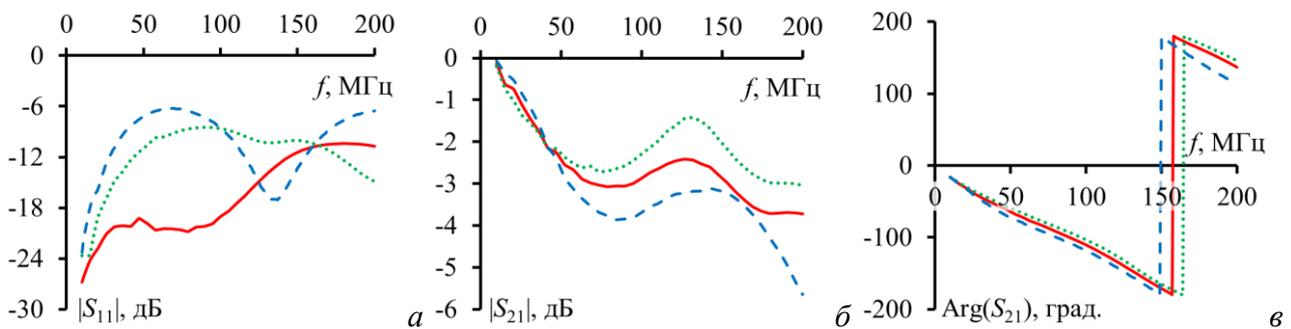


Рисунок 3.4 – Зависимости $|S_{11}|(f)$ (а), $|S_{21}|(f)$ (б) и $\text{Arg}(S_{21})(f)$ (в) структуры с однократным МР для вариантов 50-50 (—), 50-КЗ (---), 50-XX (···)

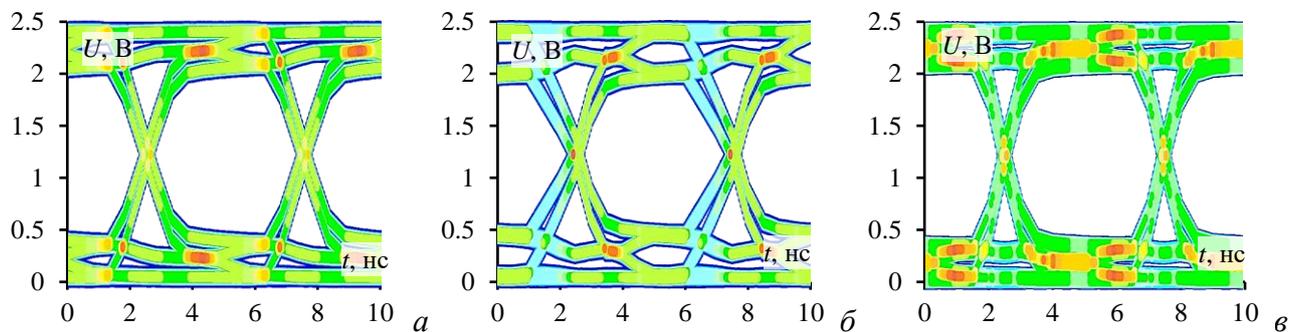


Рисунок 3.5 – Глазковые диаграммы для прохождения полезного сигнала со скоростью 200 Мбит/с для вариантов 50-50 (а), 50-КЗ (б), 50-XX (в)

В подразделе 3.2 представлен запатентованный способ компоновки печатных проводников для цепей с многократным МР на основе 3-С структуры (рисунок 3.6а). Он относится к способам компоновки ПП. Технический результат в части упрощения изготовления ПП достигается за счет соответствия технологическому процессу изготовления многослойных ПП (четное число слоев) и выполнения опорного проводника в виде отдельных печатных проводников на внутренних слоях. Технический результат в части упрощения монтажа компонентов ПП достигается за счет размещения ее компонентов на внешних слоях, а также отсутствия необходимости организовывать специальные вырезы во внешних слоях резервируемой и резервной цепей при монтаже. Технический результат в части уменьшения восприимчивости резервируемой

цепи к внешним СШП помехам достигается за счет модальных искажений кондуктивных ЭМП (рисунок 3.6б, в).

Представлены анализ и систематизация способов многократного МР на основе симметричных структур. Проведена оценка технологичности шести способов МР, их эффективности подавления СШП помех и области применения. С помощью N -норм выполнена оценка критичности разложенных импульсов для каждого способа до и после отказа. Показано, что все позволяют значительно ослабить импульс СШП помехи.

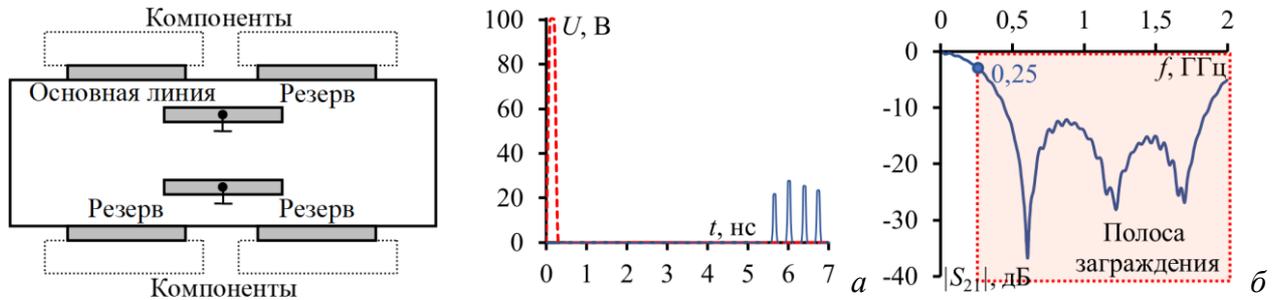


Рисунок 3.6 – Поперечное сечение (а), $U(t)$ (а) и $|S_{21}|(f)$ (б) для структуры, реализующей способ МР

В подразделе 3.3 представлена экспериментально-расчетная методика анализа характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией, сформулированная на основе полученных результатов из **подразделов 2.4 и 3.1** и **раздела 4**. Она включает в себя этапы выполнения измерений S -параметров и дальнейший переход во временную область с помощью ADS. Анализ СШП помех, спектр которых находится в частотном диапазоне измеренных S -параметров, проводится с помощью N -норм. Даны рекомендации по подготовке и проведению экспериментальных исследований. Представлен оптимальный порядок переключения резервных цепей. При этом для анализа используется минимальный набор средств, позволяющий снизить экономические и временные затраты.

4. Экспериментальное исследование устройств защиты электрических цепей от сверхширокополосных помех

В подразделе 4.1 представлены результаты исследования МФ на основе микрополосковой линии передачи (МПЛ) с двумя боковыми проводниками, заземленными на обоих концах. Экспериментально доказано, что исследуемая структура позволяет защитить электрические цепи от СШП импульса за счет его разложения на два импульса с уменьшением N -норм.

В подразделе 4.2 приведено сравнение характеристик копланарной полосковой линии (КПЛ) и МФ во временной и частотной областях. Экспериментально показано, что КПЛ не позволяет защитить РЭУ от опасного СШП импульса. Добавление двух вырезов в опорный проводник КПЛ позволило ослабить распространяющийся по линии импульс СШП помехи и уменьшить N -нормы.

В подразделе 4.3 выполнен анализ новых схем трассировки, используемых при проектировании высокочастотных МПЛ (рисунки 4.1 и 4.2). Изготовлены два их прототипа, со структурой проводников в виде меандра и спирали.

Рассчитанный уровень дальней перекрестной наводки не превышает 4,4% от амплитуды полезного сигнала. Проведены их электродинамическое моделирование и измерения в ТЕМ-камере (для минимизации внешних помех) в диапазоне частот от 10 МГц до 5,3 ГГц. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.3. Результаты эксперимента показали уменьшение амплитуды СШП помехи (N_1) не менее чем в 4 раза, скорости изменения напряжения (N_2) – в 10,7 раза и более (рисунок 4.4 и таблица 4.1), эффективного значения напряжения (N_5) – не менее чем в 2,2 раза. С точки зрения $U(t)$ в порту ПЗ (центральный проводник ТЕМ-камеры), оценивающих излучаемые эмиссии, МФ2 предпочтительнее МФ1 (рисунок 4.5).

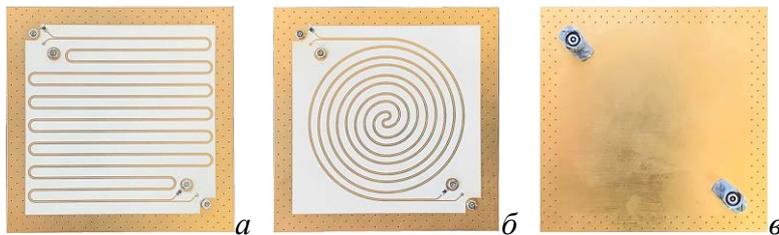
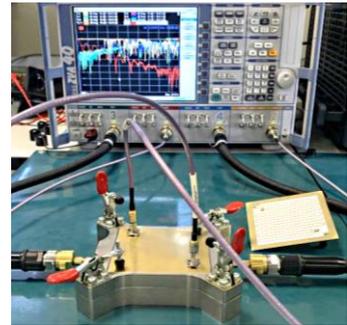
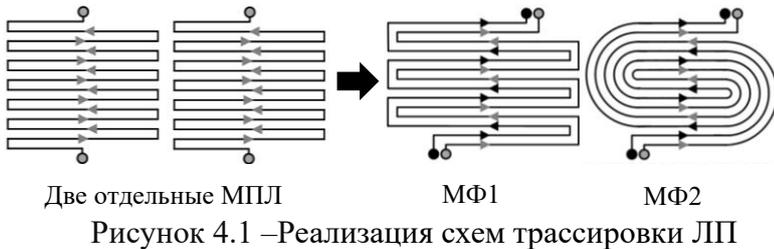


Рисунок 4.2 – Верхние слои МФ1 (а) и МФ2 (б), нижний слой обоих МФ (в)

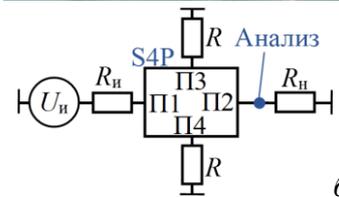


Рисунок 4.3 – Эксперимент (а) и схема анализа МФ в ADS (б)

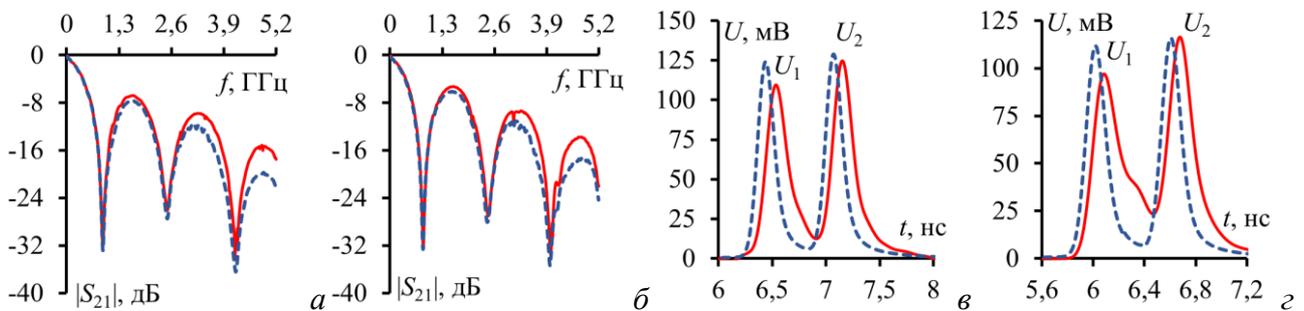


Рисунок 4.4 – $|S_{21}|(f)$ (а) с $U(t)$ (в) в порту П2 для МФ1 и $|S_{21}|(f)$ (б) с $U(t)$ (г) для МФ2, полученные в ходе электродинамического моделирования (—) и измерений (---)

Таблица 4.1 – Значения N-норм разложенных импульсов для МФ1 и МФ2

Данные	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{12}$	$N_4 \cdot 10^{12}$	$N_5 \cdot 10^6$
ЭДС/2	0,5	4,61	82	82	5,39
МФ1 (Изм.)	0,125	0,43	65	66	2,19
МФ1 (Мод.)	0,129	0,53	57	58	2,12
МФ2 (Изм.)	0,116	0,38	64	65	2,06
МФ2 (Мод.)	0,115	0,37	50	51	1,91

В подразделе 4.4 представлены результаты исследования МФ1 с РПМ (ЗИПСИЛ 601 РПМ-01). На рисунке 4.6 приведены поперечное сечение такой структуры, $U(t)$ для различных значений h_1 и зависимости

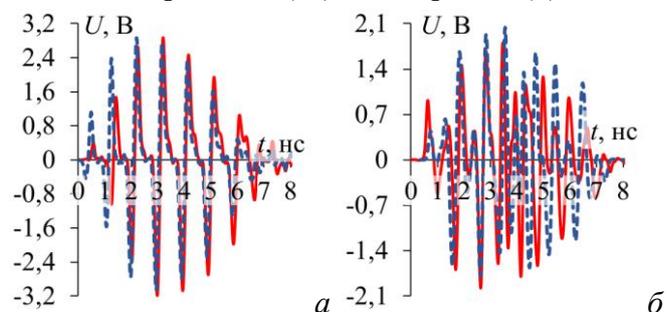


Рисунок 4.5 – $U(t)$ в порту ПЗ для МФ1 (а) и МФ2 (б), полученные в ходе моделирования (—) и измерений (---)

и зависимости

погонных задержек (τ_i) и их разности ($\Delta\tau$) от h_1 . На рисунках 4.7 приведены $|S_{21}|(f)$ МФ1 и МФ1 с РПМ, и $U(t)$ в порту П2. Видно, что применение РПМ увеличило вносимые потери. Так, значение f_c уменьшилось с 335 до 60 МГц (по результатам измерений). Уменьшение f_r на 660 МГц обусловлено ростом $\Delta\tau$. Применение РПМ значительно снизило амплитуду импульсов разложения и увеличило $\Delta\tau$. В результате, МФ1 с РПМ может раскладывать СШП импульс большей длительности. Для МФ1 без РПМ экспериментально показано уменьшение N_1 в 4,31 раза, N_2 – 6,52 раза, N_5 – 1,87 раза, тогда как с РПМ N_1 – в 17,2 раза, N_2 – 70 раз, а N_5 – 4,6 раза. Таким образом, применение РПМ значительно снижает вероятность возникновения различного рода отказов.

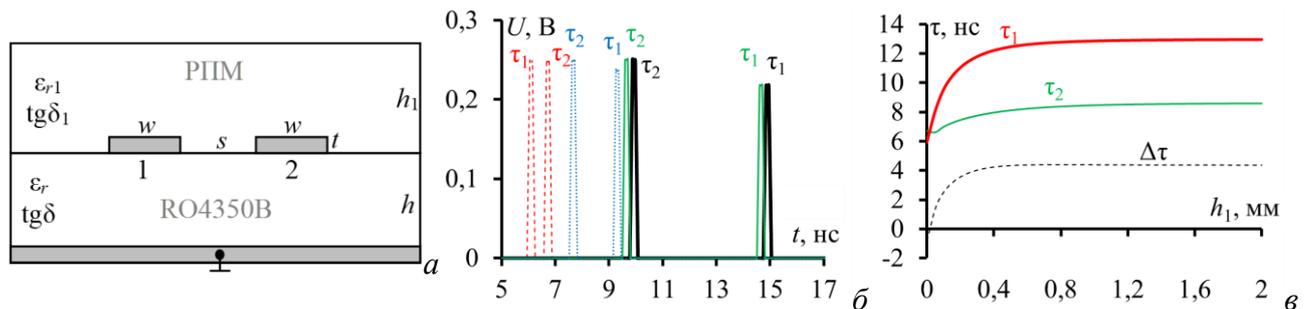


Рисунок 4.6 – Поперечное сечение МФ1 с РПМ (а), зависимости $U(t)$ (б) в порту П2 при толщине РПМ 0 (---), 0,05 (···), 0,75 (—) и 2 (— · —) мм и зависимости τ от h_1 (в)

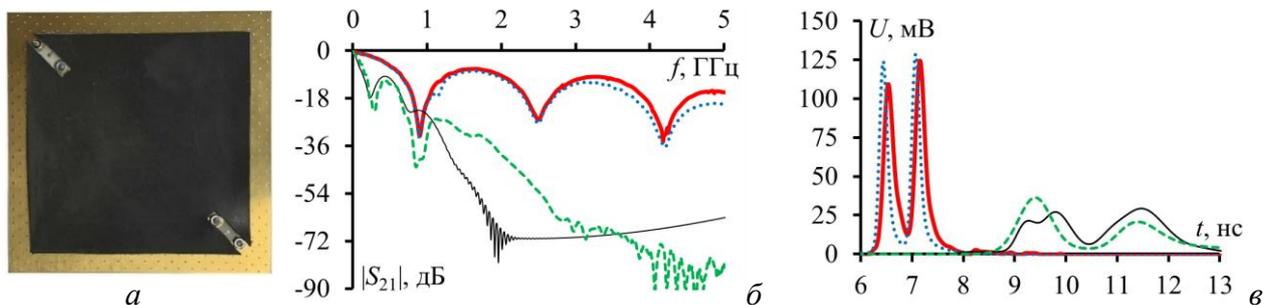


Рисунок 4.7 – Прототип МФ1 с РПМ (а), $|S_{21}|(f)$ (б) и $U(t)$ (в), по измерениям (—) и моделированию (···) исходного МФ1, а также измерениям (---) и моделированию (- -) МФ1 с РПМ

В подразделе 4.5 выполнен анализ эффективности экранирования корпуса фильтра подавления ЭМП для шины электропитания космического аппарата. Определены конфигурации, обеспечивающие наилучшие и наихудшие значения эффективности экранирования.

В подразделе 4.6 приведены порядок и рекомендации проектирования межсоединений ПП для защиты сигнальных и силовых цепей от СШП помех. Приведены примеры реализации МФ на ПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования:

1. Представлены характеристики 4-слойного 3-С МФ во временной и частотной областях. Выявлено, что СМО слабо влияют на характеристики такого МФ. Показано, что применение четвертьволновых резонаторов и РПМ в конструкции 2-проводного МФ и 4-слойного 3-С МФ позволяет улучшить помехоподавление СШП помех.

2. Исследованы структуры с МР до и после отказов. Выявлено, что МР позволяют уменьшить амплитуду СШП помех и их N -нормы. Выполнен анализ целостности полезного сигнала в структуре с однократным МР. Показано, что рассогласование резервной цепи не приводит к значительному искажению полезного сигнала. На основе 3-С структуры предложен новый способ компоновки печатных проводников для цепей с МР. Предложена экспериментально-расчетная методика анализа структур с модальной фильтрацией, включающая в себя измерения S -параметров в частотном диапазоне, переход во временную область для вычисления откликов на воздействие СШП помех и оценку уменьшения их опасности на основе N -норм.

3. Представлены результаты эксперимента для МФ на основе МПЛ с двумя боковыми проводниками, заземленными на обоих концах. Рассмотрена защита РЭУ от воздействия СШП помех. Сравнены характеристики КПЛ и МФ во временной и частотной областях. Выполнен анализ новых схем трассировки, используемых при проектировании высокочастотных МПЛ. Изготовлены два их прототипа, со структурой проводников в виде меандра и спирали. Результаты эксперимента показали, что они уменьшают N -нормы СШП помех.

Рекомендации: четвертьволновые резонаторы и РПМ могут быть использованы для улучшения характеристик структур с модальной фильтрацией; результаты могут использоваться для дальнейших исследований и возможности создания различных конфигураций устройств с МР; результаты могут быть использованы при проектировании межсоединений ПП для защиты электрических цепей от СШП помех; примененные подходы к моделированию, оптимизации и экспериментальному исследованию структур с модальной фильтрацией могут быть применены в образовательном процессе вузов.

Перспективы дальнейшей разработки темы: экспериментальное исследование 3-С МФ с четвертьволновыми резонаторами; комплексное исследование влияния РПМ на характеристики структур с модальной фильтрацией в ближней зоне; реализация РЭУ с однократным и многократным МР; исследование схем трассировки высокочастотных линий передачи со структурой проводников в виде спирали и меандра с сильной связью между проводниками; экспериментальное подтверждение защиты РЭУ от СШП помех большой мощности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. 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. **Жечев, Е.С.** Влияние рассогласования структуры с сильными модальными искажениями на целостность сигнала / **Е.С. Жечев**, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – № 4. – С. 162–168.

3. Zhecheva, A.V. Simulating integrated circuit immunity to powerful conducted emissions in circuits with single modal reservation / A.V. Zhecheva, **Y.S. Zhechev** // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2021. – №. 4. – P. 122–126.

4. **Жечев, Е.С.** Анализ и систематизация способов трассировки печатных проводников на основе симметричных структур с модальной фильтрацией / **Е.С. Жечев**, И.А. Иванцов, А.С. Козинец // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 1–18.

5. **Zhechev, Y.S.** Signal integrity analysis for the four-layer reflection symmetric modal filter // Journal of radio electronics. – 2022. – № 8. – P. 1–16.

6. Разработка устройства защиты от сверхкоротких импульсов для цепей электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры / В.П. Костелецкий, Е.Б. Черникова, **Е.С. Жечев**, А.М. Заболоцкий // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 8. – С. 1–19.

Статьи в журналах, входящих в Q1, Q2 WoS или Scopus

7. Using N -norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / **Y.S. Zhechev**, A.V. Zhecheva, A.A. Kvasnikov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, no. 12.

8. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout / М.А. Samoylichenko, **Y.S. Zhechev**, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2021. – Vol. 63, no. 2. – P. 435–442.

9. Medvedev, A.V. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, **Y.S. Zhechev**, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – P. 1–18.

10. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment / A.O. Belousov, **Y.S. Zhechev**, E.B. Chernikova, A.V. Nosov, T.R. Gazizov // Complexity. – 2022. – P. 1–23.

11. **Zhechev, Y.S.** New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber / **Y.S. Zhechev**, A.H. Adnan, K.P. Malygin // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 86663–86670.

Статьи в журналах, индексируемых в WoS и Scopus

12. Electromagnetic interference filter for spacecraft power bus / **Y.S. Zhechev**, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560, no. 1. – P. 012133.

13. Development of modal filter prototype for spacecraft busbar protection against ultrashort pulses / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky, **Y.S. Zhechev**, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560, no. 1. – P. 012145.

14. Medvedev, A.V. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov, **Y.S. Zhechev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488, no. 1. – P. 012015.

15. Medvedev, A.V. Analysis of frequency characteristics of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, **Y.S. Zhechev** //

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, no. 2. – P. 022037.

16. Using N-norms for analysing a device with a single modal reservation / **Y.S. Zhechev**, A.V. Zhecheva, A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1611, no. 1. – P. 012065.

17. **Zhechev, Y.** The Analysis of Shielding Effectiveness of the enclosure of an EMI-Filter for a Spacecraft Power Bus / **Y. Zhechev**, A. Zabolotsky // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 15. – P. 470–475.

18. Hasan, A.A. Estimation of radiated emissions from a structure with a single modal reservation / A.A. Hasan, **Y.S. Zhechev**, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 1. – P. 012003.

19. **Zhechev, Y.S.** Experimental study of a high current electromagnetic interference filter for the spacecraft power bus / **Y.S. Zhechev**, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 1. – P. 012024.

20. **Zhechev, Y.S.** Multicriteria optimization of a four-layer reflection-symmetric modal filter parameters for ESD protection / **Y.S. Zhechev**, I.A. Ivantsov, A.M. Zabolotsky // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 1. – P. 012023.

21. **Zhechev, Y.S.** Quasi-static analysis of a two-conductor modal filter with a thin passive conductor / **Y.S. Zhechev**, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 1. – P. 012016.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

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

23. A device for an ultrashort pulse attenuation in common and differential modes in the high voltage power supply circuits of the spacecraft / R.R. Khazhibekov, **Y.S. Zhechev**, A.M. Zabolotsky, V.P. Kosteletskii // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020. – P. 179–182.

24. **Zhechev, Y.S.** Experimental study of the buried vias effect on reflection symmetric modal filter performance // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020. – P. 200–204.

25. **Zhechev, Y.** The use of quarter-wave resonators to improve modal filters performance / **Y.S. Zhechev**, A.M. Zabolotsky // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2021. – P. 204–207.

26. Samoylichenko, M.A. Comparing electrical characteristics of coplanar waveguides and modal filters / M.A. Samoylichenko, **Y.S. Zhechev** // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2022. – P. 204–207.

27. Kosteletskii, V.P. Method for experimental study of circuits with triple modal reservation in time and frequency domains / V.P. Kosteletskii, A.V. Medvedev, **Y.S. Zhechev** // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2022). – Magnitogorsk, September 23 – September 25, 2022. P. 1–6.

28. Chernikova, E.B. Time response analysis for reflection symmetric meander lines using quasistatic and electrodynamic approaches / E.B. Chernikova, **Y.S. Zhechev** // 2022 International Conference (Actual Problems of Electron Devices). – Saratov, September 22 – September 23, 2022. – P. 1–4.

Патент

29. Патент РФ на изобретение № 2751672. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием / **Жечев Е.С.**, Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Черникова Е.Б. Заявка № 2020126549. Заявлен 10.08.2020. Опубликовано 15.07.2021.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618764. Анализ четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра / 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.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618824. Анализ двухпроводного зеркально-симметричного модального фильтра / 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.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680554. Анализ четырехслойной зеркально-симметричной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием / **Жечев Е.С.**, Заболоцкий А.М. Заявка №2021680034. Дата поступления 08.12.2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2021 г.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680560. Обработка экспериментальных данных зеркально-симметричных структур / **Жечев Е.**, Трубченинов В.А., Сурков В.А., Кузьмин Н.О., Заявка №2021669877. Дата поступления 07.12.2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2021 г.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616144. Анализ многослойных зеркально-симметричных структур / **Жечев Е.**, Козинец А.С., Иванцов И.А., Заболоцкий А.М., Заявка № 2022615113. Дата поступления 29.03.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.04.2022 г