

На правах рукописи



Самойличенко Мария Александровна

**Повышение качества защиты  
от нежелательных импульсных воздействий  
в конфигурациях полосковых линий передачи  
с дополнительными проводниками в заземленном основании**

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

Официальные оппоненты – **Горбачев Анатолий Петрович**,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
радиоприемных и радиопередающих устройств  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет»;

**Муравьев Сергей Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»

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

Защита состоится 20 сентября 2022 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУРа, 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/i9bklfsi>

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических  
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Развитие современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) идет по пути непрерывного роста быстродействия, автономности и компактности. Однако, расширение диапазона рабочих частот, уменьшение уровней питающих напряжений, а также увеличение плотности монтажа, ухудшают электромагнитную совместимость (ЭМС) РЭА. Элементы РЭА становятся более уязвимыми к электромагнитным помехам различного происхождения, особенно преднамеренным. Опасным их видом являются мощные сверхкороткие импульсы (СКИ). Кондуктивные СКИ проникают в РЭА непосредственно по проводникам, например, сигнальным или питания. Они опасны из-за высокой проникающей способности, обусловленной малой длительностью воздействия, большой мощностью и широким спектром. При воздействии СКИ могут иметь место сбои и выход из строя РЭА. Кроме того, СКИ применяются для выявления уязвимости РЭА.

### Степень разработанности темы

Проблема ЭМС широко освещается на отечественных и международных конференциях и в журналах. Ею активно занимаются специалисты из России, США, Китая, Швеции, Германии, Англии и других стран.

В анализ стойкости электронных систем к воздействию СКИ, создание методов измерений и экспериментальной проверки методик расчета внесли значительный вклад Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, В.Ю. Кириллов, Л.О. Мырова, Н.В. Балюк и П.В. Степанов, исследования кондуктивных воздействий через сеть электропитания – В.И. Кравченко, С.И. Комягин, Ю.В. Парфенов, В.Е. Фортов и С.Р. Петров, анализ воздействий СКИ на вычислительную технику – З.М. Гизатуллин, Р. Киричюк и С.Ф. Чермошенцев. За рубежом прикладные исследования и разработки пассивных полосковых фильтров для защиты от СКИ вели М. Camp, R. Krzikalla, T. Weber под руководством J.L. ter Haseborg, H. Garbe, F. Sabath (Германия). Обширный круг исследований различных аспектов СКИ, который начал С. Baum, велся под руководством D.V. Giri, E.G. Farr, E. Schamiloglu и др. в Лос-Аламосе, в Университете Нью-Мексико (США).

Микрополосковые конструкции широкополосных полосно-пропускающих фильтров исследовали Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, С.А. Ходенков, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев и В.Ф. Шабанов. Многосвязные полосковые структуры исследовали Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов и А.Н. Сычев. Для защиты от СКИ предложены модальные фильтры (МФ), которые активно исследуют Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов и Е.Б. Черникова.

Достоинствами МФ являются дешевизна, небольшая масса, повышенная надежность, радиационная стойкость и высокое быстродействие, интегрируемость в печатные платы. В МФ происходит разложение помехового импульса на моды поперечных волн, каждая из которых распространяется со своей задержкой, так что на выход МФ приходят импульсы с меньшей амплитудой. Технология модальной фильтрации исследуется в разных

направлениях: МФ на печатных платах и в виде кабелей, меандровые линии, модальное резервирование. Однако, у любого МФ есть пассивный проводник, который занимает место и имеет массу, а некоторые МФ сложны в реализации (например, на многослойных печатных платах). Поэтому для повышения качества защиты актуально исследовать новые возможности реализации МФ без этих недостатков. Так, возможны модификации (например, за счет вырезов в опорной плоскости) широко используемых микрополосковых и копланарных линий, реализованных на обычной двухсторонней печатной плате (ДПП).

**Цель работы** – выявить возможности повышения качества защиты РЭА от СКИ за счет модальной фильтрации на ДПП.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор устройств защиты РЭА от импульсных помех.
2. Выполнить параметрическую оптимизацию и анализ МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости.
3. Выполнить параметрическую оптимизацию и анализ МФ на ДПП, в том числе с лицевыми и боковыми связями.
4. Разработать макеты МФ и выполнить натурные эксперименты для верификации.

#### **Научная новизна**

1. Предложен нетрадиционный подход к использованию микрополосковой линии для ослабления распространяющегося по ней сверхкороткого импульса, отличающийся выполнением двух симметричных вырезов в опорной плоскости.

2. Теоретически и экспериментально доказано, что выполнение в опорной плоскости копланарной полосковой линии двух вырезов симметрично существующим верхним вырезам, соединение опорных проводников между собой на концах и замена резистивных нагрузок на концах пассивного проводника между вырезами на короткое замыкание и холостой ход могут ослаблять распространяющийся по линии сверхкороткий импульс, в том числе при удалении верхнего опорного проводника.

3. Впервые экспериментально выявлены, кроме импульсов мод, дополнительные импульсы во временном отклике на сверхкороткий импульс, влияющие на его ослабление, при изменении нагрузок на концах пассивного проводника модальных фильтров с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости и на двухсторонней печатной плате с соединенными на концах опорными проводниками, в том числе без верхнего.

#### **Теоретическая значимость**

1. Изучены особенности влияния параметров поперечного сечения на временные отклики МФ: с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости; на ДПП, для двух способов соединения опорных проводников; без верхнего опорного проводника при соединении опорных проводников только на концах; на ДПП, с лицевыми и боковыми связями, в том числе при удалении нижнего пассивного проводника; зеркально-симметричного на ДПП.

2. Показано влияние: асимметрии на погонные задержки мод и амплитуду импульсов разложения в МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости; удаления одного и двух опорных проводников на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах; экрана на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины.

3. Показана возможность разложения СКИ: в МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями в его конфигурациях с удалением одного и двух пассивных проводников и при каскадном соединении двух модальных фильтров одинаковой длины.

4. Выявлены закономерности появления дополнительных импульсов во временном отклике каждого рассмотренного МФ в отдельности.

5. Приведено качественное сравнение МФ на ДПП.

#### **Практическая значимость**

1. Разработаны макеты МФ на ДПП для экспериментальных исследований модального разложения СКИ.

2. Получены параметры поперечного сечения для 6 структур МФ, позволяющие минимизировать амплитуду выходного напряжения.

3. Внедрены результаты квазистатического моделирования МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости в качестве варианта устройства помехозащиты бортовой РЭА в АО «ИСС», г. Железногорск (акт внедрения).

4. Внедрены результаты квазистатического моделирования МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости и на ДПП в учебный процесс бакалавриата по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» ТУСУР, г. Томск (акт внедрения).

#### **Методология и методы исследования**

Результаты работы получены при помощи квазистатического моделирования (основанного на методе моментов и модифицированном методе узловых потенциалов), модального анализа и оптимизации эвристическим поиском. Натурный эксперимент в частотной области проводился с помощью скалярного и векторного анализаторов цепей, а во временной – комбинированного стробоскопического осциллографа.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Два симметричных выреза в опорной плоскости микрополосковой линии позволяют ослабить распространяющийся по линии сверхкороткий импульс: до 7,8 раза в тракте 50 Ом при подложке из стеклотекстолита.

2. Выполнение в опорной плоскости копланарной полосковой линии двух вырезов симметрично существующим верхним вырезам, соединение опорных проводников между собой на концах и замена резистивных нагрузок на концах пассивного проводника между вырезами на короткое замыкание и холостой ход могут ослаблять распространяющийся по линии сверхкороткий импульс, в том числе при удалении верхнего опорного проводника.

3. С заменой резистивных нагрузок на концах пассивного проводника модальных фильтров на короткое замыкание и холостой ход появляются, кроме импульсов мод, дополнительные импульсы в их временном отклике на воздействие сверхкороткого импульса и увеличивается его ослабление: с 2,3 раза до 7,8 раза в модальном фильтре с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости; с 5,4 раза до 6,7 раза в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате с соединенными на концах опорными проводниками и с 6,6 раза до 7,7 раза без верхнего опорного проводника.

#### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов основана на корректном использовании теории многопроводных линий передачи и численных методов, а также согласованности результатов: моделирования и измерений; квазистатического и электродинамического подходов. Реализуемость предложенных устройств подтверждена патентами на изобретение, моделированием и экспериментально.

#### **Использование результатов исследований**

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

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

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

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

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

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

7. НИР «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей,

радиолокационных систем и их компонент», проект FEWM-2020-0039, 2020–2022 г.

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

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

10. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию полосковых устройств защиты радиоэлектронной аппаратуры на основе модальной фильтрации», грант РФФИ «Аспиранты» 20-37-90033, 2020–2022 г.

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

#### **Апробация результатов**

Результаты позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: ФЦП ИР, грантов Президента РФ; РФФИ; госзадания; РФФИ; на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2020 г., назначение стипендий Правительства РФ в 2021 и 2022 г. и Президента РФ в 2021 г.

Результаты представлялись в материалах следующих конференций: межд. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2016, 2017, 2019, 2021 г.; межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2016, 2018, 2020, 2021 г.; межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2018, 2019 г.; межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2020 г.; Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)», 2021 г.; Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON-2019), г. Томск, 2019 г.; Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Алтай, 2020 г.

**Публикации.** Опубликовано 32 работы, в т.ч. 12 без соавторов: 4 статьи в изданиях из перечня ВАК; 2 статьи в журналах из Q1 и Q2 WoS и Scopus; 6 публикаций в других журналах, индексируемых в WoS и Scopus; 2 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 13 докладов в трудах отечественных конференций; 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 3 патента на изобретение.

**Личный вклад.** Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором. Основной объем моделирования выполнен автором единолично. Часть работ выполнена с соавторами публикаций. Разработка макетов и их измерения выполнены совместно с Е.С. Жечевым.

**Структура и объём диссертации:** введение, 4 раздела, заключение, список источников из 137 наименований, приложение из 10 с., всего 218 с., в т.ч. 136 рисунков и 70 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Защита радиоэлектронной аппаратуры от импульсных помех: обзор

В подразделе 1.1 показана актуальность обеспечения ЭМС и защиты РЭА от СШП помех, в частности от СКИ. В подразделе 1.2 выполнен обзор устройств защиты РЭА от импульсных помех, отмечены их недостатки и рассмотрены устройства защиты на основе модальной фильтрации. В подразделе 1.3 представлены подход к моделированию и программное обеспечение. В подразделе 1.4 сформулированы цель и задачи работы.

### 2. Параметрическая оптимизация и анализ модального фильтра с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости

В подразделе 2.1 исследовано влияние параметров поперечного сечения на погонные задержки мод и амплитуду импульсов разложения в МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости. Его поперечное сечение и эквивалентная схема приведены на рисунке 2.1.

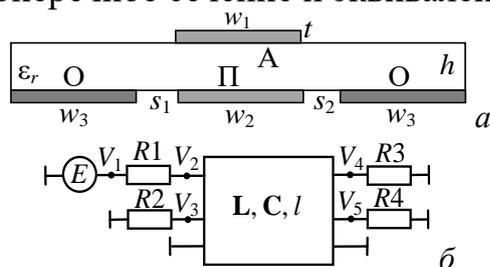


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) МФ из МПЛ

Параметры при моделировании: ширина всех проводников ( $w$ ) менялась одинаково в диапазоне от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1 мм,  $h=0,5; 1; 1,5; 2$  мм,  $s=0,2; 0,3; 0,4$  мм и  $t=18, 35$  и  $70$  мкм. Показано, что в большей степени на разность погонных задержек мод влияют  $s$ ,  $w$  и  $h$ , а меньшей –  $t$ . Так, для её увеличения надо увеличивать

$s$ ,  $w$  и  $t$  и уменьшать  $h$ . Для уменьшения амплитуды импульсов разложения надо увеличивать  $w$  и  $s$ , а также уменьшать  $h$  и  $t$ . Примечательно, что во всем диапазоне параметров значение погонной задержки моды 3 гораздо больше, чем мод 1 и 2, импульсы которых сливаются, так что на выходе МФ видно 2 импульса.

В подразделе 2.2 представлено влияние асимметрии в поперечном сечении МФ на погонные задержки и амплитуду импульсов разложения. Асимметрия за счет приближения одного опорного проводника к пассивному позволила разложить импульсы двух быстрых мод, которые при симметрии сливались. Разница их погонных задержек увеличилась до 0,46 нс/м, что уменьшило максимальную из амплитуд импульсов. Показано влияние ширины активного и пассивного проводников асимметричного МФ: её уменьшение у пассивного позволило разложить импульсы двух быстрых мод и уменьшить амплитуду напряжения на выходе.

В подразделе 2.3 исследованы дополнительные импульсы (кроме основных) во временном отклике МФ, при асимметрии поперечного сечения и изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Они

выявлены при изменении  $s_1$  от 3,5 до 0,5 мм и ХХ-КЗ. Так, на рисунке 2.2а есть 2 импульса (с номерами 1, 2), как и на рисунках 2.2б, в (с номерами 2, 4), с амплитудами больше, чем у импульсов мод. Импульсы 1 и 2 (рисунок 2.2а) и 1–4 (рисунок 2.2б, в) являются дополнительными, т.к. приходят с другими задержками. На рисунках 2.2б, в, есть и импульсы отрицательной полярности между импульсами  $3l\tau_1$  и  $3l\tau_2$ . Задержки дополнительных импульсов определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии (таблицы 2.1 и 2.2).

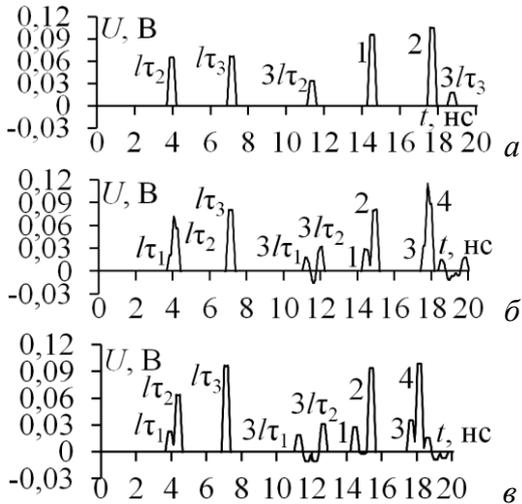


Рисунок 2.2 –  $U(t)$  на выходе МФ в режиме ХХ-КЗ при  $s_1=3,5$  (а), 1,1 (б), 0,5 (в) мм

Таблица 2.1 – Время (нс) прихода  
Дополнительных импульсов при  $s_1=3,5$  мм

№ импульса	1	2
Комбинация	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_2+2\tau_3)$
$s_1=3,5$ мм	35,679	43,604

Таблица 2.2 – Время (нс) прихода  
дополнительных импульсов при  $s_1=1,1$  и 0,5 мм

№ импульса	1	2	3	4
Комбинация	$l(\tau_3+2\tau_1)$	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_1)$	$l(\tau_2+2\tau_3)$
$s_1=1,1$ мм	35,533	36,708	43,536	44,126
$s_1=0,5$ мм	35,526	37,852	43,529	44,702

Таким образом, показано, что дополнительные импульсы появляются с асимметрией поперечного сечения, а при ХХ-КЗ на концах пассивного проводника амплитуда их может быть больше, чем у основных. Увеличение асимметрии позволяет разложить импульсы с большей амплитудой на 4 импульса, уменьшив тем самым их амплитуду.

В подразделе 2.4 показано разложение СКИ в двух каскадах МФ одинаковой длины за счет большей связи во втором, увеличивающей разность задержек мод. Амплитуды на его выходе в 12,5 раза меньше половины э.д.с. при сопротивлениях 50 Ом на концах пассивных проводников. При ХХ-КЗ, ХХ-КЗ на концах пассивных проводников каскадов амплитуда уменьшена в 19 раз. При этом ослабление определяется максимальной амплитудой дополнительных импульсов.

### 3. Оптимизация модальных фильтров на двухсторонней печатной плате

В подразделе 3.1 представлена оптимизация параметров поперечного сечения МФ на ДПП для соединения опорных проводников только на концах и вдоль всей длины. Первое дает МФ с 5 проводниками, а значит, 5 мод. Во втором все опорные проводники едины, а значит, есть лишь 2 моды. Критерии оптимизации: максимизация разности погонных задержек мод и минимизация амплитуды напряжения на выходе. У СКИ амплитуда э.д.с. 2 В и общая длительность 500 пс. Поперечное сечение и эквивалентные схемы приведены на рисунке 3.1.

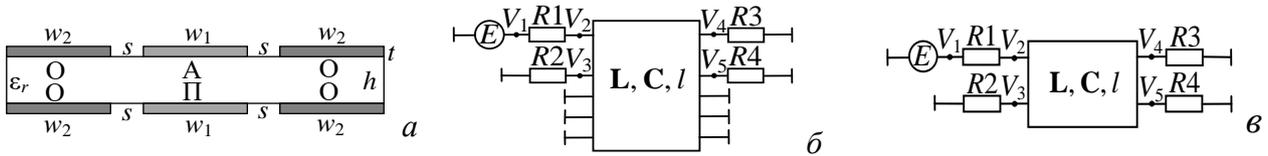


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение (а) и эквивалентные схемы МФ с опорными проводниками, соединёнными только на концах (б) и вдоль всей длины (в)

Для соединения опорных проводников только на концах и  $h=0,5$  мм,  $t=18$  мкм,  $w_1=3,15$  мм,  $w_2=0,5$  мм,  $s=2$  мм достигнуто ослабление 3,2 раза при  $R_2=R_4=50$  Ом и 5,6 раза при ХХ-КЗ, с ростом разности погонных задержек мод 2 и 5 до 2,35 нс/м (рисунок 3.2а). При  $h=0,5$  мм,  $t=0,15$  мм,  $w_1=w_2=0,1768$  мм и  $s=0,1$  мм максимизированы и выравнены разности погонных задержек (1 нс/м) трех мод (рисунок 3.2б). Моделировалось и влияние опорных проводников, в частности их количества, на разложение СКИ, поскольку удаление одного или двух из них уменьшает массу МФ.

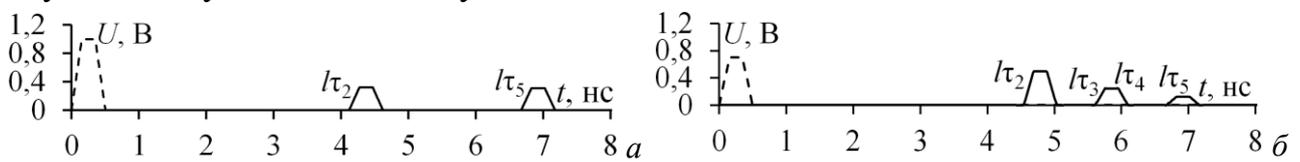


Рисунок 3.2 –  $U(t)$  на входе (- -) и выходе (-) МФ после: минимизации амплитуды напряжения на выходе (а) и выравнивания разностей погонных задержек (б)

Для соединения опорных проводников вдоль всей длины, минимальная амплитуда 0,325 В (ослабление 3 раза) и максимальная разность погонных задержек мод 2,424 нс/м достигнуты при  $h=0,5$  мм,  $t=18$  мкм,  $s=2$  мм и  $w_1=w_2=3$  мм с резисторами, а при ХХ-КЗ на концах пассивного проводника получено ослабление 6 раза (рисунок 3.3).

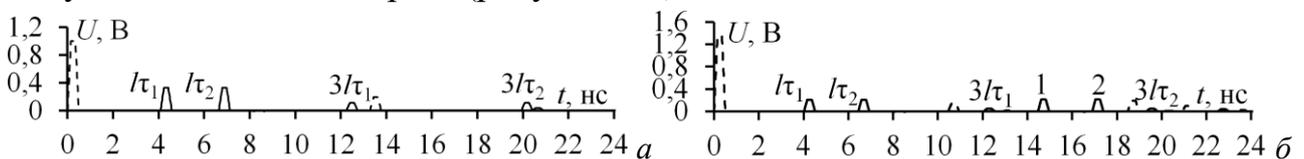


Рисунок 3.3 –  $U(t)$  на входе (- -) и выходе (-) МФ при  $R_2=R_4=50$  Ом (а) и ХХ-КЗ (б)

В подразделе 3.2 анализируются и оптимизируются МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями (рисунок 3.4), в т.ч. при удалении одного и двух пассивных проводников. Критерии оптимизации: максимизация разности максимальной и минимальной задержек импульсов, выравнивание разностей задержек соседних импульсов разложения и минимизация амплитуды напряжения на выходе. При  $h=0,5$  мм,  $s_1=90$  мкм,  $s_2=3$  мм,  $w_2=0,5$  мм,  $w_1=0,95$  мм,  $t=35$  мкм почти выравнены разности погонных задержек ( $\tau_3-\tau_2=0,77$  нс/м,  $\tau_7-\tau_6=0,77$  нс/м и  $\tau_6-\tau_3=0,91$  нс/м), с ослаблением 4 раза при нагрузках 50 Ом и 10 раз при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ (рисунок 3.5).

Оптимизировался МФ без правого нижнего пассивного проводника. При  $w_1=0,45$  мм,  $s_1=0,11$  мм,  $h=0,5$  мм,  $t=35$  мкм,  $s_2=3$  мм и  $w_2=0,5$  мм максимизирована разность максимальной и минимальной задержек импульсов, сближены значения  $\tau_3-\tau_2$  и  $\tau_6-\tau_3$  и выравнены амплитуды (0,329 В) импульсов 3 и 6 (рисунок 3.6).

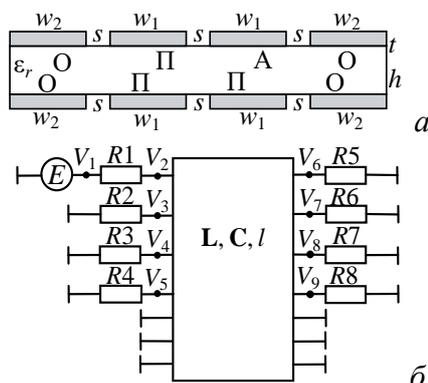


Рисунок 3.4 – Поперечное сечение (а) и схема (б) МФ

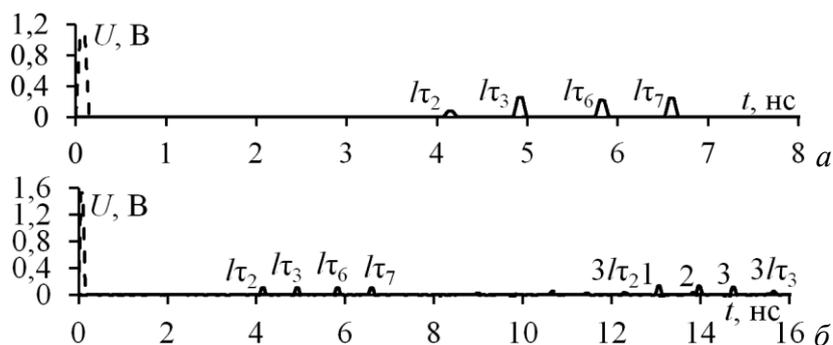


Рисунок 3.5 –  $U(t)$  на входе (---) и выходе (—) МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями при нагрузках 50 Ом (а) и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ (б)

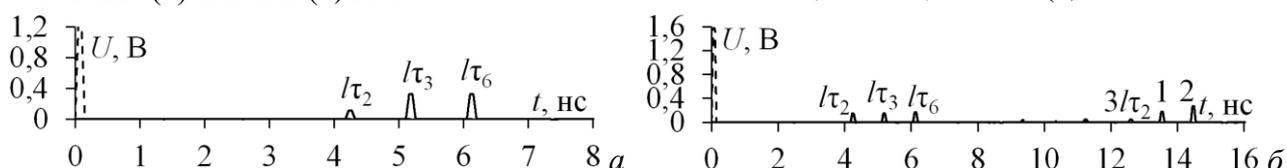


Рисунок 3.6 –  $U(t)$  на входе (---) и выходе (—) МФ с лицевыми и боковыми связями без правого нижнего пассивного проводника при нагрузках 50 Ом (а) и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ (б)

Наконец, из этого МФ получен новый зеркально-симметричный МФ за счет симметричного расположения двух опорных проводников на верхнем и нижнем слоях диэлектрика между сигнальными проводниками (рисунок 3.7).

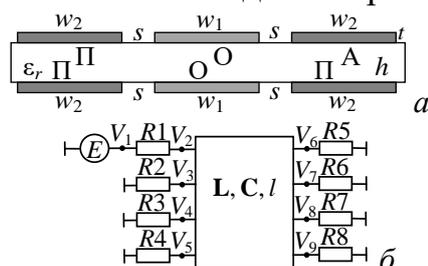


Рисунок 3.7 – Поперечное сечение (а) и схема (б) МФ

При  $w_1=1$  мм,  $w_2=3,6$  мм,  $s=0,3$  мм,  $h=2$  мм,  $t=70$  мкм достигнуто  $\tau_2-\tau_1=0,644$  нс/м,  $\tau_3-\tau_2=0,489$  нс/м и  $\tau_4-\tau_3=0,184$  нс/м, а ослабление составило 4 раза при нагрузках на всех концах по 50 Ом и 5 раз при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ.

Во всех МФ раздела 3, кроме данного МФ, ослабление при ХХ-КЗ определяется амплитудой дополнительных импульсов.

#### 4. Экспериментальное подтверждение достоверности результатов

В подразделе 4.1, для МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости, представлены результаты подготовительного моделирования по нескольким критериям и анализа влияния граничных условий на концах пассивного проводника при заданном наборе и в диапазоне параметров. Показано, что при  $w_1=w_2=w_3=1$  мм и  $s=0,5$  мм (МФ1), когда связь между активным и пассивным проводниками слабая, можно достичь ослабления СКИ около 2,54 раза ( $R_2=R_4=50$  Ом) и 4,54 раза (КЗ-ХХ), а при  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм,  $s=3$  мм (МФ2), когда связь сильная – 5 раз ( $R=50$  Ом) и 10 раз (КЗ-ХХ). Фото макетов МФ1 и МФ2 приведены на рисунке 4.1.

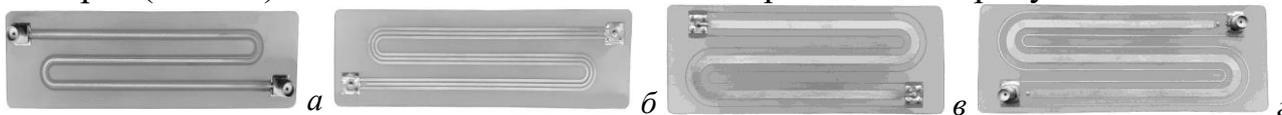


Рисунок 4.1 – Фото макетов МФ1 и МФ2 (верхний (а, в) и нижний (б, г) слой)

Как воздействие при моделировании использовался оцифрованный сигнал осциллографа С9-11 на нагрузке 50 Ом. Он имеет колоколообразную форму амплитудой 0,284 В и длительностями фронта и спада 320 и 220 пс по

уровням 0,1–0,9. Общая его длительность по уровню 0,5 составила 180 пс. На рисунках 4.2 и 4.3 показаны результаты натурального и вычислительного экспериментов для МФ1 и МФ2 соответственно.

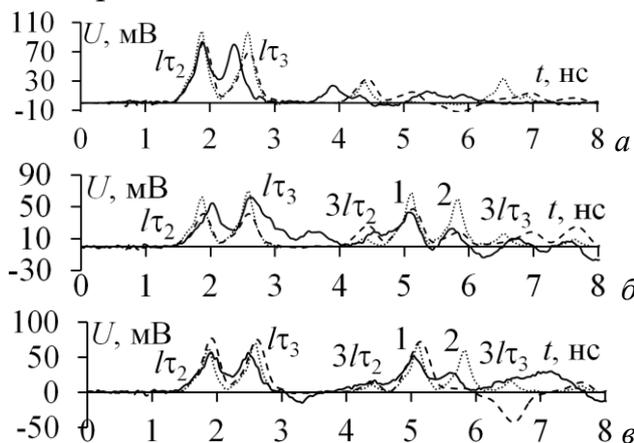


Рисунок 4.2 –  $U(t)$  на выходе МФ1 при эксперименте (-), электродинамическом (- -) и квазистатическом (· ·) моделировании с  $R2=R4=50$  Ом (а), XX-K3 (б) и K3-XX (в)

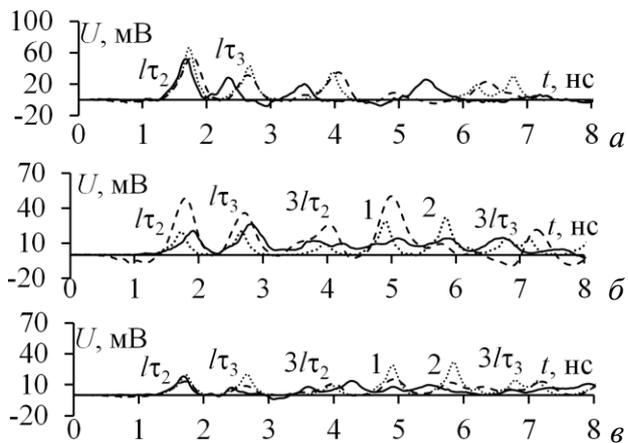


Рисунок 4.3 –  $U(t)$  на выходе МФ2 при эксперименте (-), электродинамическом (- -) и квазистатическом (· ·) моделировании с  $R2=R4=50$  Ом (а), XX-K3 (б) и K3-XX (в)

Амплитуда импульсов с увеличением связи между проводниками и изменением граничных условий (K3-XX, XX-K3) уменьшается: для МФ2 при K3-XX (рисунок 4.3в) максимальная амплитуда по результатам эксперимента 18 мВ (ослабление 7,8 раза). В МФ2 больше и разность задержек мод, поэтому нет наложения импульсов. Параметры первых двух импульсов при моделировании и эксперименте сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Амплитуды ( $U$ ) и разности погонных задержек ( $\Delta\tau$ ) для первых двух импульсов на выходе МФ1 и МФ2 при разных видах анализа

Параметр		Квазистатика			Электродинамика			Эксперимент		
		50-50	XX-K3	K3-XX	50-50	XX-K3	K3-XX	50-50	XX-K3	K3-XX
МФ1	$U_2$ , мВ	98	58	62	82	41	77	84	54	56
	$U_3$ , мВ	95	67	67	68	41	75	79	62	52
	$\Delta\tau$ , нс/м	0,72			0,68			0,54		
МФ2	$U_2$ , мВ	66	20	18	54	48	13	52	20	18
	$U_3$ , мВ	42	26	20	31	35	8	27	26	7
	$\Delta\tau$ , нс/м	0,96			0,87			0,8		

Анализ рисунков 4.2 и 4.3 показал, при XX или K3 на концах пассивного проводника, наличие дополнительных импульсов (1 и 2), а также еще двух, но с меньшими амплитудами. Комбинации и время их прихода приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры импульсов (дополнительных) при K3-XX

№ импульса	1	2
Комбинация	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_2+2\tau_3)$
МФ1	4,51 нс	5,22 нс
МФ2	4,30 нс	5,24 нс

Аналогичные результаты для частотной области показаны на рисунках 4.4, 4.5 и в таблице 4.3.

Они связаны с асимметрией граничных условий и распространением волн с различными скоростями в противоположных направлениях. При  $R2=R4=50$  Ом из-за лучшего согласования они не очень выражены.

для частотной области показаны на рисунках 4.4, 4.5 и в таблице 4.3.

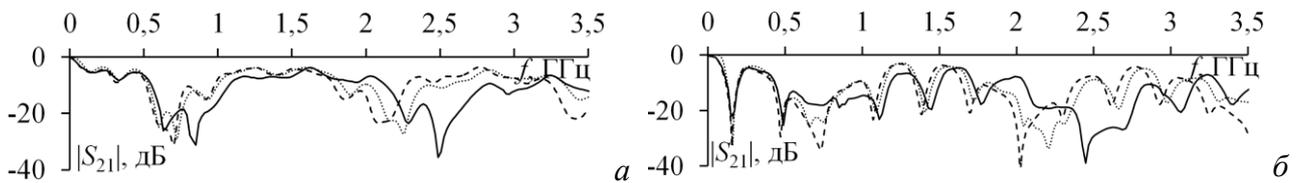


Рисунок 4.4 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  для МФ1 при  $R_2=R_4=50$  Ом (а) и КЗ-XX (б) при квазистатическом (··) и электродинамическом моделировании (- -) и эксперименте (-)

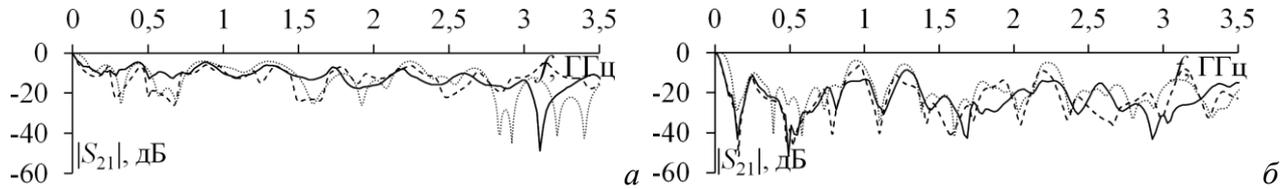


Рисунок 4.5 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  для МФ2 при  $R_2=R_4=50$  Ом (а), КЗ-XX (б) при квазистатическом (··) и электродинамическом моделировании (- -) и эксперименте (-)

Полоса пропускания МФ со слабой связью больше, чем с сильной. Переход к КЗ-XX увеличивает полосу пропускания: до 89 МГц для МФ1.

Таблица 4.3 – Полоса пропускания и резонансные частоты для МФ1 и МФ2

$f$ , МГц	Квазистатика		Электродинамика		Эксперимент	
	50-50	КЗ-XX	50-50	КЗ-XX	50-50	КЗ-XX
$f_{cMФ1}$	61	73	90	100	69	89
$f_{cMФ2}$	20	27	77	81	24	27,5
$f_{r1MФ1}$	–	156	601	160	629	149
$f_{r2MФ1}$	696	471	720	480	849	489
$f_{r1MФ2}$	291	156	320	150	289	149
$f_{r2MФ2}$	676	476	690	390	669	489

Из таблицы 4.3 видно, что при КЗ-XX частоты первого и второго резонансов уменьшаются. Отличия результатов обусловлены различием значений параметров макетов и их моделей.

В подразделе 4.2 представлены экспериментальные результаты для МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах. Выполнена оптимизация макетов со всеми опорными проводниками и без верхнего. Для временной области использовался осциллограф DSA8300 с импульсом амплитудой 0,634 В, временем фронта 14,6 пс и спада 12 пс по уровням 0,1–0,9, а общей длительностью 22 пс по уровню 0,5 (рисунок 4.6а, б). Для частотной области использовался векторный анализатор электрических цепей «Панорама» Р4226 (рисунок 4.6в). Результаты измерений сравнивались с результатами квазистатического моделирования в системе TALGAT.

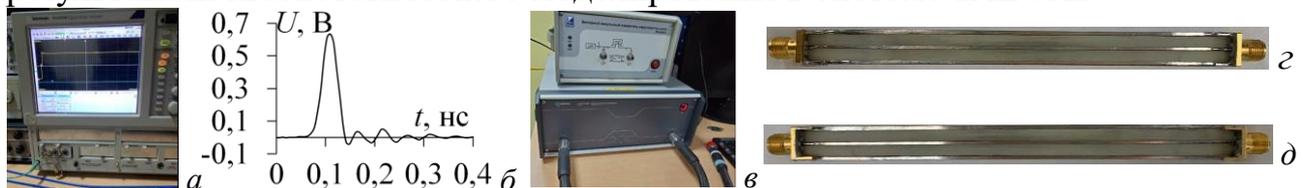


Рисунок 4.6 – Осциллограф DSA8300 (а), форма его э.д.с. (б), векторный анализатор цепей «Панорама» Р4226 (в) и фото верхнего (г) и нижнего (д) слоев макета МФ

Для изготовления макетов выполнена трассировка макета МФ. Длина макета МФ 12 см. После изготовления МФ проведен контроль геометрических параметров. Получены реальные значения геометрических параметров, средние значения которых составили:  $w_1=738$  мкм,  $w_2=985$  мкм и  $s=3255$  мкм.

На рисунках 4.6з, д показан макет МФ, а 4.7 – результаты для временной области. Видно, что СКИ раскладывается на 2 первых импульса ( $l\tau_2$  и  $l\tau_5$ ) с меньшими амплитудами. С изменением граничных условий (КЗ-ХХ) амплитуда импульсов уменьшается. Экспериментально подтверждено появление дополнительных (1 и 2 на рисунке 4.7б) импульсов при КЗ-ХХ. Они появляются после третьего прохода (когда отраженный от конца линии сигнал вернулся в начало и опять к концу). Их амплитуда меньше, чем у основных. Вычисленные комбинации и время прихода дополнительных импульсов приведены в таблице 4.5, а их амплитуды – в таблице 4.6. В согласованном случае, по результатам эксперимента, достигнуто ослабление 5,4 раза, а при КЗ-ХХ –

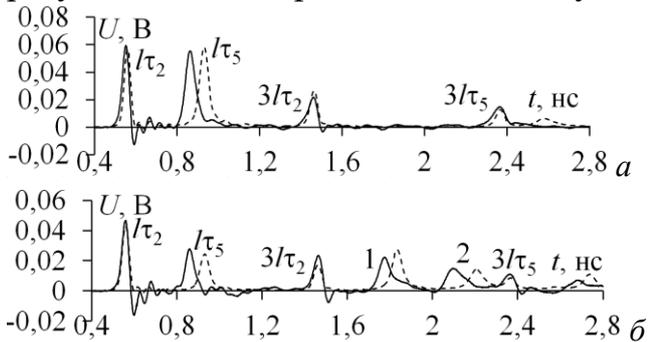


Рисунок 4.7 –  $U(t)$  на выходе МФ при эксперименте (-) и моделировании (- -) с  $R2=R4=50$  Ом (а) и КЗ-ХХ (б)

Таблица 4.5 – Параметры импульсов (дополнительных) при КЗ-ХХ

№ импульса	1	2
Комбинация	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_2+2\tau_3)$
Задержка, нс	1,73	2,11

6,7 раза. Амплитуды напряжения первых двух импульсов и разность погонных задержек мод сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры исследуемого МФ

Параметры	Моделирование		Эксперимент	
	50-50	КЗ-ХХ	50-50	КЗ-ХХ
$U_2$ , В	0,055	0,041	0,059	0,047
$U_5$ , В	0,055	0,021	0,055	0,028
$\Delta t$ , нс/м	3,7		3,1	

Таблица 4.6 – Амплитуды ( $U_i$ ) дополнительных импульсов при КЗ-ХХ

Амплитуда	Квазистатика	Эксперимент
$U_1$ , В	0,0269	0,0223
$U_2$ , В	0,0143	0,0141

На рисунке 4.8 показаны результаты для  $|S_{21}|$ . Полосы пропускания ( $f_c$ ) и резонансные частоты ( $f_i$ ) сведены в таблицу 4.7. Видно, что КЗ-ХХ увеличивает полосу пропускания. По результатам эксперимента, в согласованном случае  $f_c=120$  МГц, а при КЗ-ХХ  $f_c=150$  МГц. При КЗ-ХХ  $f_i$  уменьшаются. В итоге, экспериментально показана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП с ослаблением 6,7 раза и ростом  $f_c$  до 150 МГц.

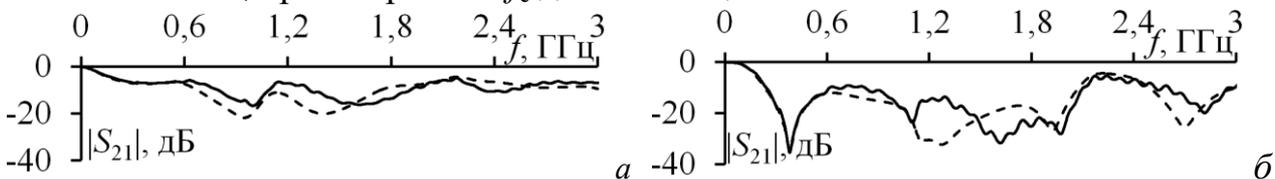


Рисунок 4.8 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при эксперименте (-) и моделировании (- -) с  $R2=R4=50$  Ом (а) и КЗ-ХХ (б)

Таблица 4.7 – Полосы пропускания и резонансные частоты МФ (МГц)

$f$ , МГц	Моделирование		Эксперимент	
	50-50	КЗ-ХХ	50-50	КЗ-ХХ
$f_c$	111	146	120	150
$f_1$	931	378	1010	378
$f_2$	1386	1146	1590	1090

На рисунках 4.9, 4.10 показаны макет МФ на ДПП без верхнего опорного проводника и результаты для временной области. В согласованном случае, по эксперименту, ослабление 6,6 раза, а при КЗ-ХХ – 7,7 раза (таблица 4.8).



Рисунок 4.9 – Фото верхнего (а) и нижнего (б) слоев макета МФ

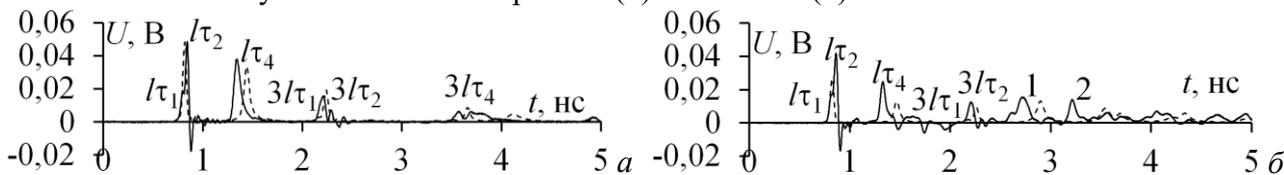


Рисунок 4.10 –  $U(t)$  на выходе МФ при эксперименте (—) и моделировании (---) при  $R_2=R_3=50$  Ом (а) и КЗ-XX (б)

Анализ рисунка 4.10 показывает согласованность результатов и появление дополнительных импульсов при КЗ-XX. Их параметры в таблицах 4.9 и 4.10.

Таблица 4.8 – Амплитуды импульсов на выходе МФ и разности погонных задержек при моделировании и эксперименте

Параметр	Моделирование		Эксперимент	
	50-50	КЗ-XX	50-50	КЗ-XX
$U_2, В$	0,048	0,025	0,048	0,041
$U_4, В$	0,033	0,012	0,037	0,024
$\tau_2-\tau_1, нс/м$	—		0,046	
$\tau_4-\tau_2, нс/м$	0,62		0,5	

Таблица 4.9 – Амплитуды дополнительных импульсов на выходе МФ при КЗ-XX

Амплитуда	Квазистатика	Эксперимент
$U_1, В$	0,132	0,0153
$U_2, В$	0,089	0,138

Таблица 4.10 – Параметры импульсов

№ импульса	1	2
Комбинация	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_2+2\tau_3)$
Задержка, нс	2,7	3,24

На рисунке 4.11 показаны результаты для  $|S_{21}|$ . Значения  $f_c$  и  $f_r$  сведены в таблицу 4.11. По эксперименту в согласованном случае полоса 63 МГц, а при КЗ-XX – 70,5 МГц. Результаты для частотной области хорошо согласуются.

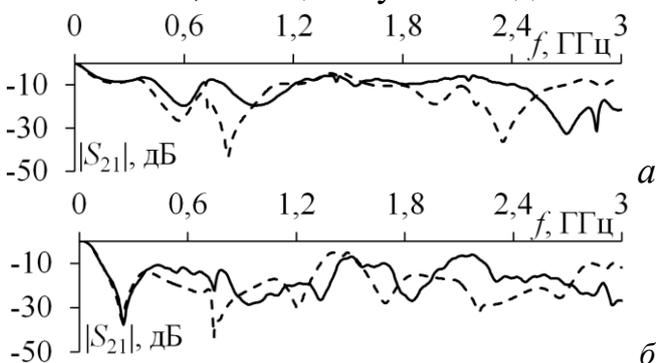


Рисунок 4.11 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при эксперименте (—) и моделировании (---) с  $R_2=R_3=50$  Ом (а) и XX-КЗ (б)

Таблица 4.11 – Полоса пропускания и резонансные частоты при моделировании и эксперименте

$f, МГц$	Моделирование		Эксперимент	
	50-50	КЗ-XX	50-50	КЗ-XX
$f_c$	54	72,5	63	70,5
$f_{r1}$	556	231	582	243
$f_{r2}$	838	741	973	741

Для подтверждения ослабления СКИ за счет двух вырезов в КПЛ выполнен отдельный эксперимент. Для этого изготовлен макет из ламината RO4350В с  $\epsilon_r=3,66$  и  $tg\delta=0,0031$  при  $h=0,25$  мм,  $t=18$  мкм,  $w_1=0,6$  мм,  $s=0,27$  мм (рисунок 4.12). Размеры ДПП 20×53 мм. Нижний слой сначала был сплошным. Полигоны соединены с ним переходными отверстиями.

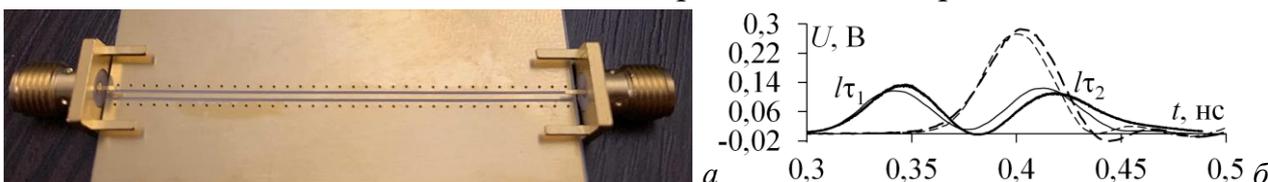


Рисунок 4.12 – Макет КПЛ (а) и  $U(t)$  на выходах КПЛ при эксперименте (—) и моделировании (---) и МФ при эксперименте (—) и моделировании (---) (б)

После измерений КПЛ, в опорной плоскости сделаны два выреза симметрично верхним, так что в ней образовался проводник, расположенный

зеркально верхнему. Концы проводника соединены с опорным резисторами 50 Ом. Результаты для временной области приведены на рисунке 4.12. В эксперименте ослабление МФ составило 2,5 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Результаты исследования

1. Исследован МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости. Изменение граничных условий на его концах увеличивает ослабление СКИ, но появляются дополнительные импульсы, амплитуда которых больше, чем у основных импульсов мод. Уменьшить их амплитуду можно за счет введения асимметрии в поперечное сечение МФ. Увеличивает ослабление СКИ и каскадное соединение двух МФ.

2. Разработаны макеты МФ со слабой и сильной связями между проводниками. Показано, что увеличение связи и изменение граничных условий на концах пассивного проводника позволяют увеличить ослабление СКИ, а уменьшение связи – полосу пропускания. Появление дополнительных импульсов доказано экспериментально.

3. Представлены результаты оптимизации МФ на ДПП для двух способов соединения опорных проводников. Исследовано влияние удаления одного и двух опорных проводников на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах. Выполнены анализ и оптимизация МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями, в т.ч. при удалении одного и двух пассивных проводников. Показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричном МФ на ДПП.

4. Разработаны макеты МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах, в т.ч. без верхнего опорного. С изменением граничных условий увеличиваются ослабление СКИ и полоса пропускания МФ. Показано появление дополнительных импульсов при КЗ-ХХ на концах пассивного проводника.

5. Выполнен эксперимент, подтвердивший, что два выреза в опорной плоскости КПЛ способны обеспечить ослабление СКИ.

**Рекомендации.** Рассмотренные МФ могут быть использованы для защиты РЭА от СКИ по сигнальным цепям и цепям питания, в частности бортовой РЭА космического аппарата, так как они обладают малой массой и габаритами. Для уменьшения массы и стоимости МФ возможно удаление одного или двух пассивных и опорных проводников, а также резисторов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Интеграция рассмотренных МФ в реальные ДПП. Исследование МФ на керамической подложке, что позволит увеличить разность погонных задержек мод и уменьшить длину МФ. Исследование влияния магнитоэлектрика и экрана (более детальное) на ослабление СКИ.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Самойличенко, М.А. Модифицированная микрополосковая линия, защищающая от сверхкороткого импульса / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 203–214.

2. Самойличенко, М.А. Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах / М.А. Самойличенко // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 4. – С. 58–71.

3. Самойличенко, М.А. Дополнительные импульсы при разложении сверхкороткого импульса в модальном фильтре с лицевой и торцевой связями на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции: проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - МЭС-2021. – Москва, Россия, март–ноябрь, 2021. – С. 134–139.

4. Самойличенко, М.А. Влияние соединения опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 9. – С. 1–17.

### Статья в журнале, входящем в Q1 Scopus

5. Samoylichenko, M.A. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout/ M.A. Samoylichenko, Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2020. – Vol. 63, no. 2. – P. 435–442.

### Статья в журнале, входящем в Q2 Scopus

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

### Публикации в журналах, индексируемых WoS и Scopus

7. Samoylichenko, M.A. Simulation of broad-side coupled modal filter with passive conductor in reference plane cutout / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 1–7.

8. Samoylichenko, M.A. Effect of close coupling on performance of a modal filter with the passive conductor in the reference plane cutout / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series. – 2019. – Vol. 1353, No. 1. – P. 1–7.

9. Samoylichenko, M.A. Simulation the time response to ultra-short pulse excitation of two cascaded modal filters with a passive conductor in the reference plane / M.A. Samoylichenko, A.M. Zabolotsky // Journal of physics: conference series, – 2020. – Vol. 1611(2020). – P. 1–4.

10. Samoylichenko, M.A. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862. – No. 012020. – P. 1–7.

11. Samoylichenko, M.A. Additional pulses in the time response of a modal filter on a double-sided printed circuit board / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // Electrica. – 2022. – Vol. 22(1). – P. 7–15.

12. Samoylichenko, M.A. Influence of the shield on the ultrashort pulse decomposition in a modal filter realized on a double-sided printed circuit board / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2022. – No. 1. – P. 1–6.

#### **Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus**

13. Samoylichenko, M.A. Influence of boundary conditions and coupling enhancement on the attenuation of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout / M.A. Samoylichenko // Proc. of IEEE 2019 Int. multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. – P. 0237–0240.

14. Samoylichenko, M.A. Additional pulses in the time response of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout / M.A. Samoylichenko // 21st Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020. – P. 159–164.

#### **Публикации в трудах других конференций**

15. Самойличенко, М.А. Моделирование модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Россия, Томск, 2016. – С. 325–327.

16. Самойличенко, М.А., Газизов Т.Т. Разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре с пассивным проводником в опорной плоскости // Материалы XII межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Россия, Томск, 16–18 ноября 2016: В-Спектр, 2016. – Т. 1. – С. 222–224.

17. Самойличенко, М.А. Анализ влияния параметров модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости на погонные задержки мод / М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов // Научная сессия ТУСУР – 2017: Материалы межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа. – Россия, Томск, 10–12 мая, 2017. – Ч. 3. С. 80–82.

18. Самойличенко, М.А. Увеличение толщины фольги как ресурс совершенствования модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости // 24-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-24-2018)». – Томск, Россия, 28 ноября, 2018. – С. 167–172.

19. Самойличенко М.А. Моделирование модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости при разной толщине подложки //

Материалы XIV межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018. – С. 302–304.

20. Самойличенко, М.А. Анализ влияния параметров модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости на амплитуду импульсов разложения // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам межд. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019». – Томск, Россия, 22–24 мая, 2019. – Ч. 1. – С. 273–275.

21. Самойличенко, М.А. Асимметрия как ресурс совершенствования модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, В.В. Самойличенко // 25-я Всеросс. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2019». – Томск, Россия, 19 ноября, 2019. – С. 168–174.

22. Самойличенко, М.А. Моделирование временного отклика на воздействие сверхкороткого импульса двух последовательно соединенных модальных фильтров с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости / М.А. Самойличенко, А.М. Заболоцкий // Сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, Россия, 21–24 апреля, 2020. – Т. 7. – С. 117–120.

23. Самойличенко, М.А. Влияние ширины активного и пассивного проводников на характеристики асимметричного модального фильтра с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости / М.А. Самойличенко // 26-я межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-26-2020». – Томск, Россия, 24 ноября, 2020. – С. 127–133.

24. Самойличенко, М.А. Уменьшение массы модального фильтра на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Материалы XV межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 18 – 20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 275–278.

25. Самойличенко, М.А. Влияние экрана на разложение сверхкороткого импульса в модальных фильтрах на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко // 27-я межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-27-2021». – Томск, Россия, 16 ноября, 2021. – С. 152–157.

26. Samoylichenko, M.A. Additional pulses in the time response of a modal filter on a double-sided printed circuit board with two diagonal reference conductors / M.A. Samoylichenko // Сборник избранных статей межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск, Россия, 19–21 мая, 2021. – Ч. 3. – С. 196–199.

27. Самойличенко, М.А. Экранированный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко // Материалы XVII межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 19–21 ноября, 2021. – Ч. 1. – С. 275–278.

**Патенты**

28. Патент на изобретение №2728327 РФ. Модифицированная микрополосковая линия с улучшенной защитой от сверхкоротких импульсов. – Самойличенко М., Газизов Т.Р. – №2019140943; Заяв. 09.12.2019; Опубл. 29.07.2020, Бюл. №22.

29. Патент на изобретение №2732805 РФ. Модифицированная микрополосковая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов. – Самойличенко М., Газизов Т.Р. – №2019138503; Заяв. 27.11.2019; Опубл. 22.09.2020, Бюл. №27.

30. Патент на изобретение №2762336 РФ. Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием. – Самойличенко М., Газизов Т.Р. – №2021105511; Заяв. 04.03.2021; Опубл. 20.12.2021, Бюл. №35.

**Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618763. Анализ модального фильтра на двухсторонней печатной плате со смещенными активным и пассивным проводникам. Автор: Самойличенко М.А. Заявка 2021682066. Дата поступления 29 декабря 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 января 2022.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618763. Анализ экранированного модального фильтра на двухсторонней печатной плате. Автор: Самойличенко М.А. Заявка 2021682112. Дата поступления 29 декабря 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 января 2022.