

На правах рукописи



Хажибеков Роман Русланович

МНОГОКАСКАДНЫЕ МОДАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2019

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

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор
технических наук, заведующий кафедрой
конструирования и производства
радиоэлектронных средств ФГБОУ ВО МИРЭА-
Российского технологического университета,
г. Москва

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-
Бруевича»

Защита состоится 20 декабря 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, 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/jnluxhgg>

Автореферат разослан ____ ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук, профессор



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) сегодня актуально, поскольку современная РЭА восприимчива к влиянию электромагнитных помех (ЭМП). Кроме того, чтобы вывести из строя РЭА или ухудшить её функционирование, используются преднамеренные ЭМП. Одним из опасных преднамеренных воздействий является сверхкороткий импульс (СКИ). Исследования отечественных и зарубежных ученых показали уязвимость РЭА к СКИ. Он занимает широкий спектр, перекрывающий большую часть диапазонов работы РЭА, а из-за малой длительности импульса, основная энергия генератора расходуется на увеличение амплитуды СКИ, что приводит к значительному повышению напряженности электрического поля. Сильное электрическое поле приводит к пробоем полупроводниковых приборов и конденсаторов в помехоподавляющих фильтрах, а время срабатывания варисторов и разрядников может значительно превышать длительность СКИ. Поэтому актуальна разработка устройств защиты РЭА от СКИ.

Исследованиями стойкости оборудования к воздействию СКИ занимаются З.М. Гизатуллин, Ю.В. Парфенов, А.В. Разумов, S. Vass. Исследования вопросов ЭМС и функциональной безопасности выполняют Б.Б. Акбашев, Н.В. Балюк, А.М. Бобрешов, Л.Н. Кечиев, J.L. ter Haseborg, W. Radasky. Разработкой фильтров на основе полосковых структур занимаются Б.А. Беляев, А.А. Лексиков и А.М. Сержантов. Исследования связанных линий передачи выполняют Н.Д. Малютин, А.Н. Сычев, Э.В. Семенов.

Для защиты аппаратуры от кондуктивных ЭМП широко применяют разрядники, варисторы, TVS-диоды или гальваническую трансформаторную развязку. Для защиты от СКИ предложены модальные фильтры (МФ), в которых не используются радиоэлектронные компоненты, а применяются особые структуры, способствующие разложению СКИ на импульсы меньшей амплитуды. Большой вклад в развитие модальной фильтрации внесли Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и И.Е. Самотин.

МФ обладает длительным сроком службы и является стойким к воздействию радиации, но имеет ряд недостатков. В частности, актуален поиск новых решений для уменьшения размеров МФ и увеличения разности задержек мод. Немаловажным фактором для обеспечения ЭМС является функционирование МФ с заданным качеством при воздействии на него ЭМП, в то же время помехоэмиссия от него не должна мешать работе других устройств. Применение устройства в конкретной отрасли требует рассмотрения дополнительных условий. Например, при разработке МФ для силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата (КА), необходимо учитывать силу тока, температуру окружающей среды, массогабаритные и механические характеристики устройства, а также возможность защиты в синфазном и противофазном режимах возбуждения. Для применения МФ в системах передачи информации необходимо улучшать частотные характеристики

устройства, такие как ширина полосы пропускания и крутизна спада амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для реализации этих решений предлагается использование многокаскадных структур МФ.

Цель работы – разработать многокаскадные модальные фильтры. Для ее достижения надо решить следующие задачи:

1. Исследовать характеристики модальных фильтров для защиты сетевого оборудования.
2. Исследовать возможность совершенствования модальной фильтрации за счет применения периодического профиля области связи проводников.
3. Исследовать возможность защиты оборудования космического аппарата от сверхкороткого импульса за счет модальных фильтров с лицевой связью.
4. Выполнить совершенствование защиты оборудования от сверхкороткого импульса за счет многокаскадных модальных фильтров и совместного включения модального фильтра с фильтром на основе элементов с сосредоточенными параметрами.

Научная новизна

1. Впервые выполнена оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии от семикаскадного модального фильтра и показана возможность уменьшения этого уровня за счет выравнивания длины полувитков.
2. Впервые показана возможность увеличения значения и изменения знака разности задержек мод в структурах модальных фильтров с торцевой связью и периодическим профилем области связи.
3. Предложена защита бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата от сверхкороткого импульса в цепях высоковольтного питания, отличающаяся использованием модального фильтра с лицевой связью.
4. Впервые показана возможность увеличения крутизны спада амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с каскадным включением или наличием пассивного проводника, разделенного на отрезки линий передачи.

Теоретическая значимость

1. Изучены особенности влияния периодического профиля области связи проводников модальных фильтров на разность задержек мод.
2. Для модальных фильтров со встречно-штыревой структурой проводников предложен способ и выражения для вычисления матриц погонных коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции.
3. Изучены особенности влияния количества отрезков пассивного проводника на крутизну спада амплитудно-частотной характеристики и ширину полосы пропускания модального фильтра с лицевой связью.
4. Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования, в т.ч. квазистатический анализ, метод моментов, модифицированный узловый метод, электродинамический анализ, экспериментальные методы измерения характеристик.

Практическая значимость

1. Измерены излучаемые электромагнитные эмиссии семикаскадных модальных фильтров для защиты оборудования Fast Ethernet.

2. Разработаны макеты модального фильтра: со встречно-штыревой структурой проводников для защиты оборудования вычислительных сетей и с лицевой связью для защиты оборудования космического аппарата.

3. Измерены частотные и временные характеристики каскадного соединения модальных фильтров, модальных фильтров с пассивным проводником, разделенным на отрезки линий передачи и гибридного соединения модального фильтра с помехоподавляющим фильтром.

4. Даны рекомендации по проектированию меандровых линий задержки на печатной плате с минимальной амплитудой перекрестных наводок и выбору подхода к моделированию для решения задач электромагнитной совместимости.

Методы исследования. В работе применены квазистатический анализ, основанный на методе моментов и модифицированном методе узловых потенциалов, электродинамический анализ, основанный на методе конечного интегрирования, параметрическая оптимизация, а также натурный эксперимент с использованием скалярного анализатора цепей и комбинированного стробоскопического осциллографа.

Положения, выносимые на защиту

1. Выравнивание длины полувитков семикаскадного модального фильтра позволяет уменьшить максимальный уровень излучаемой электромагнитной эмиссии на 5 дБ.

2. Использование периодического профиля области связи проводников модальных фильтров с торцевой связью и подложкой из стеклотекстолита позволяет увеличить модуль разности временных задержек мод с 0,85 до 3,7 нс/м.

3. Устройство для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата на основе модальных фильтров с лицевой связью позволяет ослабить амплитуду сверхкороткого импульса длительностью до 0,45 нс в 24 раза в синфазном и в 12 раз в противофазном режиме возбуждения.

4. Разделение пассивного проводника модального фильтра с лицевой связью на отрезки линий передачи позволяет увеличить ширину полосы пропускания и крутизну спада амплитудно-частотной характеристики.

Достоверность результатов основана на корректном использовании метода моментов и теории линий передачи и подтверждается согласованностью результатов, полученных разными методами моделирования и натурным экспериментом, а также использованием результатов на практике.

Использование результатов исследований

1. НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры», проектная часть государственного задания №8.1802.2014/К, 2016 г.

2. НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РНФ 14-19-01232, 2016 г.

3. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов», базовая часть государственного задания №8.9562.2017/БЧ, 2017 г.

4. НИР «Разработка методологии защитных устройств на основе модальной технологии», грант Президента РФ №14.256.18.356–МД, 2018–2019 гг.

5. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект RFMEFI57417X0172, 2017–2019 гг.

6. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РНФ 19-19-00424, 2019 г.

7. Учебный процесс магистрантов ТУСУР.

Апробация результатов

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (2016, 2017, 2018); Межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР» (2017, 2018, 2019); IV Научно-техническая конф. молодых специалистов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» 2017, Межд. научно-метод. конф. «Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования»; 2017 Int. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON); Межд. IEEE-сибирская конф. по управлению и связи (SIBCON-2019); 20th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2019).

Структура и объем диссертации. В состав входят введение, 6 глав, заключение, список литературы из 118 наименований, приложение из 6 с. Объем с приложением – 202 с., в т.ч. 149 рисунков и 13 таблиц.

Публикации. По результатам исследований опубликованы 22 работы, в т.ч. 4 без соавторов: 3 статьи в журналах из перечня ВАК; 3 публикации в журнале, индексируемом в WoS и SCOPUS; 3 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и SCOPUS; 12 докладов в трудах других конференций и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Достоверность результатов основана на корректном использовании метода моментов и теории линий передачи и подтверждена согласованностью

результатов, полученных разными методами моделирования и натурным экспериментом, а также использованием результатов на практике.

Личный вклад. В опубликованных работах [2, 7, 8, 9, 13, 19] автором выполнены моделирование и анализ результатов, а также частично выполнена постановка целей и задач исследования. В работах [1, 6, 10] автором выполнены моделирование и анализ результатов, частично выполнена постановка целей и задач исследования, а также выполнен натурный эксперимент совместно с соавторами. В работах [4, 5, 11, 16, 17, 18, 20, 21] автору принадлежат частично постановка задачи, получение и анализ результатов. Работы [3, 12, 14, 15] выполнены автором лично. В работе [22] соискателем выполнена апробация двух- и трехмерного электростатического и трехмерного электродинамического анализа и вычисления отклика произвольных схем многопроводных линий передачи.

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В разделе 1 приведен обзор проблемы защиты РЭА от СКИ. В разделе 2 представлены результаты исследования характеристик МФ для защиты сетевого оборудования, в т.ч. сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования, моделирование макетов МФ, оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии МФ. В разделе 3 приведены результаты исследований и разработки МФ с периодическим профилем области связи проводников (встречно-штыревым, *L*-образным и спиралевидным профилями), приведены выражения для вычисления параметров МФ со встречно-штыревой структурой проводников, выполнена разработка макета МФ со встречно-штыревой структурой проводников. В разделе 4 приведены результаты разработки и исследования характеристик МФ для защиты оборудования КА от СКИ. В разделе 5 исследованы характеристики многокаскадного исполнения МФ и гибридных устройств защиты, в т.ч. решения по увеличению крутизны спада АЧХ и ширины полосы пропускания, разработке и измерению характеристик гибридных устройств защиты. В разделе 6 описано использование результатов работы, в т.ч. даны рекомендации. В заключении сделаны выводы по работе. В приложении приведены копии актов внедрения и других документов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Защита радиоэлектронной аппаратуры от помехового СКИ: обзор

В разделе 1.1 рассмотрена опасность воздействия СКИ на РЭА. В разделе 1.2 выполнен обзор устройств защиты от кондуктивных помех. В разделе 1.3 рассмотрены основы модальной фильтрации. В разделе 1.4 рассмотрены основные подходы к моделированию и программное обеспечение. В разделе 1.5 сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2. Исследование характеристик МФ для защиты сетевого оборудования

В разделе 2.1 представлены результаты квазистатического и электродинамического моделирования МФ с боковой связью и зеркально-симметричного МФ. В разделе 2.2 выполнено электродинамическое моделирование макетов семикаскадных МФ с учетом потерь. Показано, что МФ

обладают требуемой полосой пропускания в 100 МГц и ослабляют СКИ длительностью 0,3 нс в 12 раз. В разделе 2.3 показано, что уровень излучаемой электромагнитной эмиссии не превышает требований RE102 стандарта MIL-STD-461G в частотном диапазоне до 10 ГГц. Рассмотрено влияние выравнивания длины полувитков на уровень излучений. Измерения проводились на расстоянии 10 мм от макетов МФ с помощью пробника RS E 02, подключенного к анализатору R&S ESR EMI Test Receiver. МФ включались в разрыв между персональным компьютером и розеткой сети Fast Ethernet и эмулировалась передача данных (аудио, видео, ICMP). Фотографии макетов показаны на рисунке 2.1 а измеренные частотные зависимости напряжения на пробнике – на рисунке 2.2.

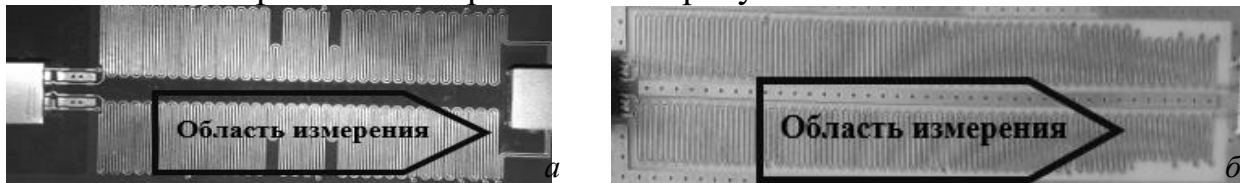


Рисунок 2.1– Фотографии макетов семикаскадного МФ: исходного (а) и с выравненной длиной полувитков (б)

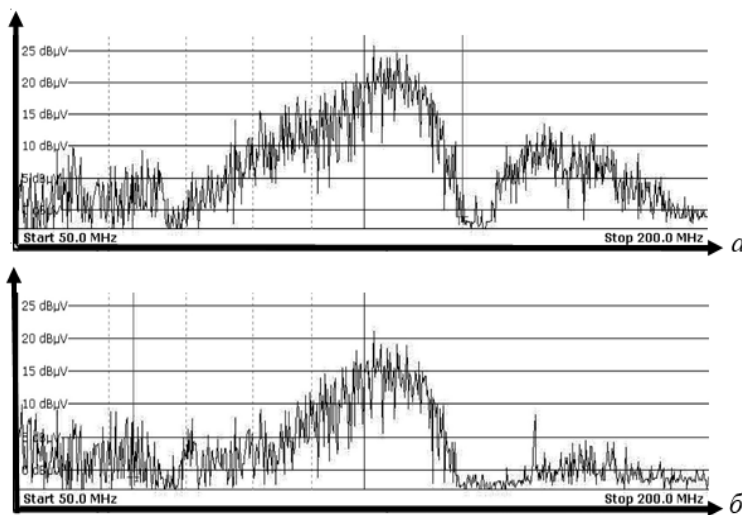


Рисунок 2.2 – Уровни напряжения на выходе пробника (дБмкВ) при измерении поля от семикаскадных МФ: исходного (а) и с выравненной длиной полувитков (б)

Максимальный уровень напряжения на выходе пробника от исходной конструкции составляет 25 дБмкВ, а от усовершенствованной – 20 дБмкВ. Кроме того, напряжение на частотах выше частоты резонанса для исходной конструкции составляет 13 дБмкВ, а для усовершенствованной 8 дБмкВ.

3. МФ с периодическим профилем области связи проводников

В разделе 3.1 исследовано влияние пилообразного профиля области связи проводников МФ на задержку импульса. Результаты моделирования показали, что в таких структурах изменяется знак разности задержек мод по сравнению со структурами без периодического профиля. В разделе 3.2 представлены результаты вычисления разности задержек мод МФ длиной 0,1 м со встречно-штыревым (длина штырей $l_p=1,4$ мм и $l_p=2,1$ мм), L-образным и спиралевидным профилями с помощью выражения

$$|\Delta\tau| = \frac{1}{2f_{180}}, \quad (3.1)$$

где f_{180} – резонансная частота, на которой $|S_{21}| \rightarrow 0$, а $|S_{41}| \rightarrow 1$. Для каждой структуры вычислялись S -параметры, на основании которых находились значения $|\Delta\tau|$. Полученные значения $|\Delta\tau|$ приведены в таблице 3.1, из которой видно, что наибольшее значение $|\Delta\tau|$ дает спиралевидная структура. Частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{41}|$ для спиралевидной и исходной структур приведены на рисунке 3.1.

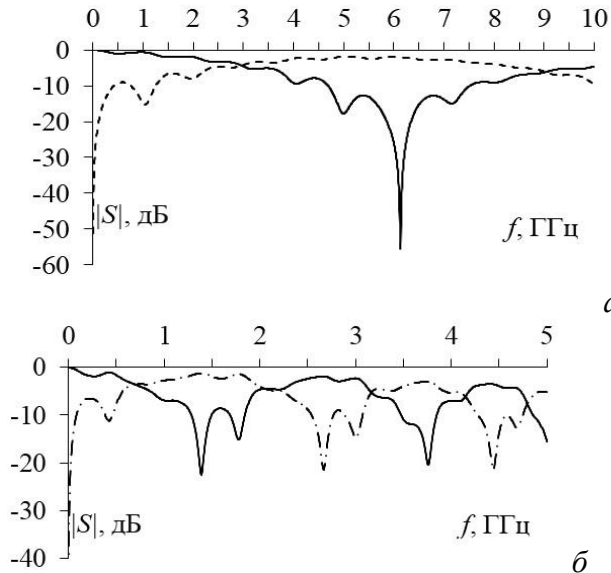
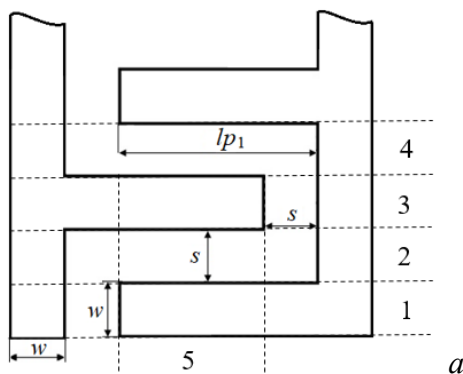


Рисунок 3.1 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ (—), $|S_{41}|$ (---) для исходной (а) и спиралевидной структур (б)

рисунке 3.2. Матрицы $\mathbf{L}$ вычисляются для элементов 1–4, а $\mathbf{C}$ – для 1–5. Поперечное сечение элемента 5 упрощенно рассматривается как связанная линия со слоем земли на нижней стороне подложки.



Использование встречно-штыревой топологии позволяет увеличить значение разности задержек мод в 2,2 раза (при $lp=1,4$ мм) и 4 раза (при $lp=2,1$ мм) относительно исходной. Применение топологии L-типа приводит к увеличению разности задержки мод в 2,8 раза, а спиралевидной – в 4,5 раза.

В разделе 3.3 получены выражения для вычисления матриц коэффициентов электростатической ($\mathbf{C}$) и электромагнитной ($\mathbf{L}$) индукций МФ со встречно-штыревой структурой проводников. МФ разбивается на отдельные элементы, как показано на

Таблица 3.1 – Значения $|\Delta\tau|$ (нс) и f_{180} (ГГц) для МФ с периодическим профилем области связи проводников

Вид структуры	f_{180} , ГГц	$ \Delta\tau $, нс
Исходная	6,135	0,085
Встречно-штыревая ($lp=1,4$ мм)	2,645	0,19
Встречно-штыревая ($lp=2,1$ мм)	1,54	0,32
L-образная	2,17	0,23
Спиралевидная	1,386	0,37

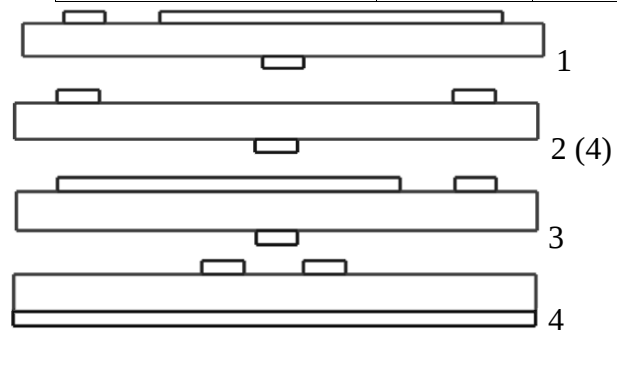


Рисунок 3.2 – Фрагмент проводников МФ (а) и поперечные сечения элементов (б)

Матрицы $\mathbf{L}$ и $\mathbf{C}$ встречно-штыревой структуры заданной длины можно вычислить как

$$\mathbf{L}_{\text{вш}} = N(w(\mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_3) + 2s\mathbf{L}_2); \mathbf{C}_{\text{вш}} = N(w(\mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_3) + 2s\mathbf{C}_2 + (lp - s)\mathbf{C}_5), \quad (3.2)$$

где $\mathbf{C}_1, \mathbf{L}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{L}_2, \mathbf{C}_3, \mathbf{L}_3, \mathbf{C}_5, \mathbf{L}_5$ – матрицы погонных коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции для элементов 1, 2, 3 и 5 соответственно; N – количество штырей активного или пассивного проводника, lp – длина штырей, w – ширина штырей (соответствует длине элементов 1 и 3) и s – расстояние между штырями (соответствует длине элементов 2 и 4). На основе матриц $\mathbf{L}_{\text{вш}}$ и $\mathbf{C}_{\text{вш}}$ можно вычислить разность задержек мод как

$$|\Delta\tau| = \left| \sqrt{(\mathbf{L}_{\text{вш}_{11}} + \mathbf{L}_{\text{вш}_m})(\mathbf{C}_{\text{вш}_{11}} - \mathbf{C}_{\text{вш}_m})} - \sqrt{(\mathbf{L}_{\text{вш}_{11}} - \mathbf{L}_{\text{вш}_m})(\mathbf{C}_{\text{вш}_{11}} + \mathbf{C}_{\text{вш}_m})} \right|. \quad (3.3)$$

Из (3.3) определена разность задержек мод $|\Delta\tau| = 0,195$ нс для МФ с $lp = 1,4$ мм и $|\Delta\tau| = 0,32$ нс для МФ с $lp = 2,1$ мм. Таким образом, результаты вычислений по (3.1) и (3.3) согласуются.

В разделе 3.4 представлены результаты оптимизации параметров МФ со встречно-штыревой топологией в области связи для реализации защиты оборудования Fast Ethernet от импульсов с максимальной длительностью. Оптимизировалась структура с $lp = 1,4$ мм. Оптимизация выполнена по критериям максимизации коэффициента передачи ($|S_{21}| \rightarrow 1$) в частотном диапазоне от 0 до 1 ГГц и минимизации частоты первого резонанса ($f_{180} \rightarrow \min$). Сумма этих двух критериев позволит увеличить разность задержек мод и сохранить требуемую ширину полосы пропускания. Изменялись параметры $s = 0,4$ мм и $w = 0,3$ мм в диапазоне $\pm 50\%$, при постоянной длине структуры. После оптимизации были получены значения параметров $s = 0,384$ мм и $w = 0,18$ мм. Структура с оптимизированными параметрами длиной 0,1 м обеспечивает разность задержек мод 0,41 нс при полосе пропускания в 1,18 ГГц.

В разделе 3.5 представлены результаты разработки макета МФ со встречно-штыревой структурой проводников. Результаты электродинамического анализа показали, что разработанная конструкция с длиной проводников 0,3 м обеспечивает разность задержек мод 1,15 нс, такую же, как МФ без периодического профиля области связи при длине 1,3 м. При этом габариты макета уменьшаются с 155×12 мм² до 58×12 мм². Внешний вид изготовленного макета представлен на рисунке 3.3. Измеренные формы напряжения на выходе МФ при воздействии СКИ длительностью 0,3 нс представлены на рисунке 3.3. Пассивный проводник в первом случае включался в режиме 100 Ом в начале и конце, во втором – в режиме короткого замыкания в начале и холостого хода в конце (КЗ-ХХ).

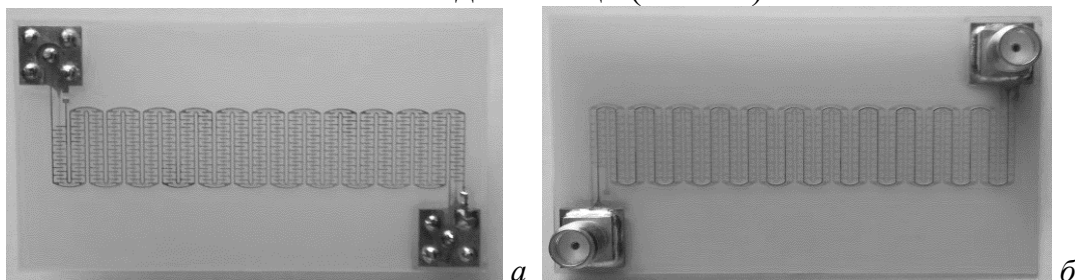


Рисунок 3.3 – Фотографии сверху (а) и снизу (б) макета МФ со встречно-штыревой структурой проводников

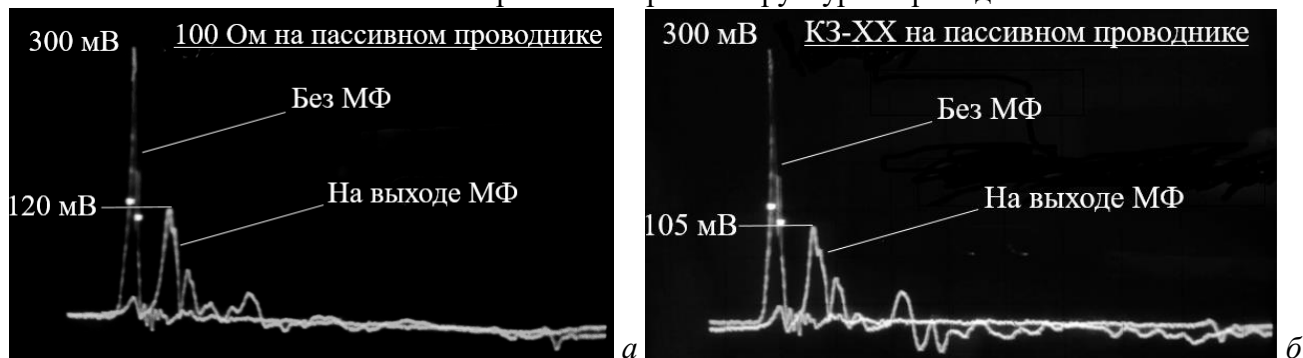


Рисунок 3.4 – Формы напряжения на выходе МФ со встречно-штыревой структурой проводников при включении пассивного проводника в режиме 100 Ом (а) и в режиме КЗ-ХХ (б)

4. МФ с лицевой связью для защиты оборудования КА от СКИ

В разделе 4.1 выполнен выбор и обоснование структуры МФ с лицевой связью. Учитывались следующие требования: максимально допустимое напряжение 600 В, волновое сопротивление тракта 50 Ом, длительность помехового СКИ 0,45 нс. В программе TALGAT найдены оптимальные геометрические параметры, при которых среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод равно 50 Ом: $w=5,5$ мм, $s=2$ мм, $t=0,105$ мм, $h=0,79$ мм. Длина МФ выбрана равной 0,28 м. Поперечное сечение структуры и схема включения представлены на рисунке 4.1.

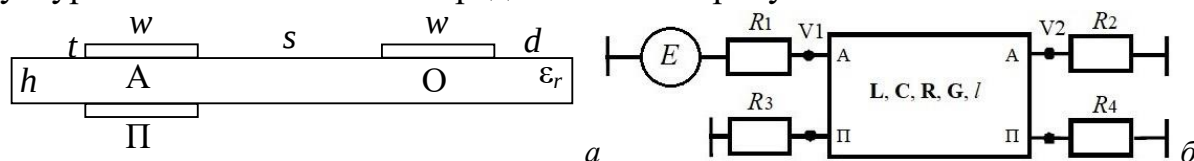


Рисунок 4.1 – Поперечное сечение МФ с лицевой связью для защиты КА, где проводники:

А – активный, П – пассивный и О – опорный (а), и схема включения МФ (б)

В разделе 4.2 выполнено моделирование МФ с лицевой связью, представленного в разделе 4.1. Пассивный проводник МФ включался в двух режимах: 50 Ом на обоих концах и КЗ-ХХ. Результаты квазистатического анализа при $R3=R4=50$ Ом показали ослабление СКИ в 3,65 раза и в режиме КЗ-ХХ на пассивном проводнике – 6,41 раза, а результаты электродинамического анализа – в 4 раза при $R3=R4=50$ Ом и в 7,14 раза в режиме КЗ-ХХ на пассивном проводнике. На основе полученных результатов изготовлен прототип МФ, фотографии которого представлены на рисунке 4.2. Пассивный проводник МФ включается в режиме КЗ-ХХ.

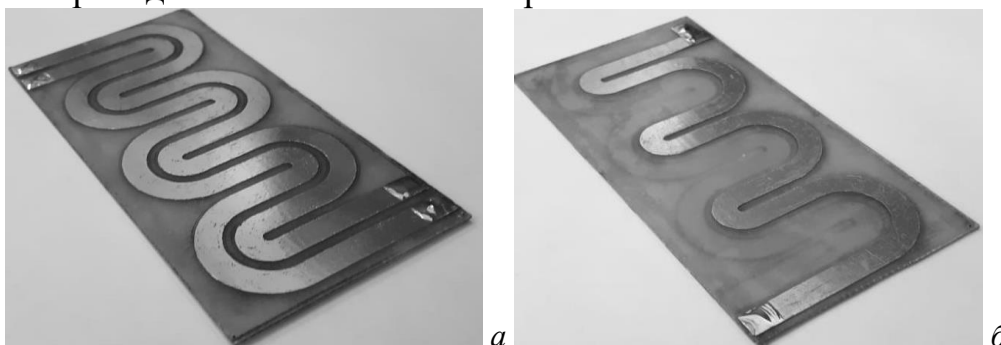


Рисунок 4.2 – Прототип ПП МФ с лицевой связью: виды сверху (а) и снизу (б)

Измерены формы напряжения на входе осциллографа С9-11 при воздействии СКИ амплитудой 0,713 В и длительностью 0,3 нс по уровню 0,5 его амплитуды. Измерения выполнены без МФ и при включении МФ между генератором и осциллографом. Также измерена частотная зависимость $|S_{21}|$ МФ с помощью прибора Р2М-40 для сравнения с результатами электродинамического анализа. Результаты измерений представлены на рисунке 4.3.

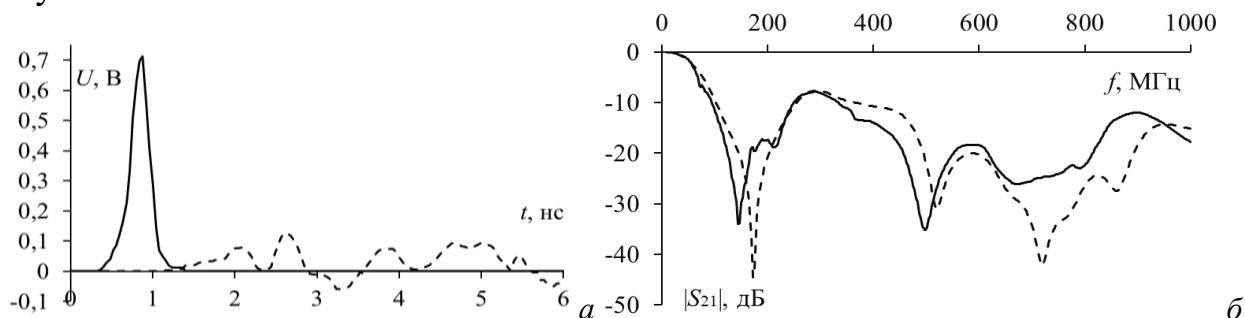


Рисунок 4.3 – Формы напряжения на входе С9-11 при воздействии СКИ без МФ (—) и с МФ (- -) (а) и частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ: измеренная (—) и вычисленная (---) (б)

Амплитуда напряжения на входе осциллографа при включении МФ составила 0,127 В (ослабление в 5,61 раза). По результатам измерений полоса пропускания составила 60 МГц, а моделирования – 63 МГц.

В разделе 4.3 вычислены формы напряжения на выходе МФ при воздействии ЭСР. С помощью квазистатического анализа исследовалась структура, представленная на рисунке 4.1, длиной 0,276 (исходная), 1, 2, 3 м при включении пассивного проводника в режимах 50 Ом, КЗ-ХХ и ХХ-КЗ. результаты квазистатического анализа показали, что наилучшее ослабление пикового значения амплитуды ЭСР в МФ исходной длины получено при $R_3=R_4=50$ Ом (1,83 раза). Однако для ослабления ЭСР наиболее предпочтительно использовать МФ длиной 3 м с включением пассивного проводника в режиме КЗ-ХХ (ослабление в 2,97 раза).

В разделе 4.4 исследована конструкция двухслойного МФ с лицевой связью. Эта конструкция позволяет в 2 раза увеличить максимальный ток в МФ из-за его протекания по двум проводникам. В МФ два активных проводника соединяются между собой в начале и конце, также, как и опорные. Пассивный проводник включался в режиме КЗ-ХХ. Результаты электродинамического анализа показали, что данная структура ослабляет СКИ длительностью 0,45 нс в 5,9 раза.

В разделе 4.5 исследовалась конструкция низкоомного МФ с лицевой связью. На рисунке 4.4 представлен внешний вид силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата и прикрепленный к ней корпус для устройств защиты. Разрабатывался МФ с учетом ширины корпуса (40 мм).

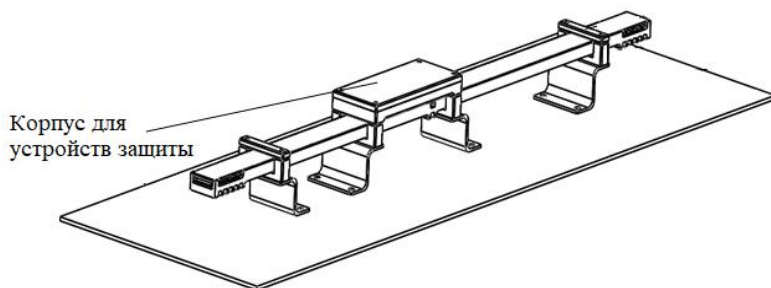


Рисунок 4.4 – Изометрический вид МФ на панели СШЭП (без проводных отводов)

погонных параметров МФ при изменении ширины проводника с 1 до 17 мм, при $s=2$ мм и $h=0,5$ мм. Наибольшее значение $|\Delta\tau|$ равно 3,5 нс/м и обеспечивается при $w=17$ мм. Кроме того, в этом случае обеспечивается наименьшее среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод $Z_{\text{в}}=23,11$ Ом. Получены результаты моделирования, показавшие, что при $w=17$ мм и длине структуры 75 мм МФ подавляет СКИ в 4,76 раза при включении пассивного проводника в режиме 50 Ом и в 8,33 раза при включении пассивного проводника в режиме КЗ-ХХ.

В разделе 4.6 исследовано влияние алюминиевых стенок корпуса на формы напряжения на выходе низкоомного МФ с лицевой связью. Выявлено, что стенки корпуса сбоку на расстоянии 2 мм от края проводников не влияют на формы напряжения на выходе МФ. При этом верхняя и нижняя стенки влияют мало на формы напряжения на выходе МФ на расстоянии 12 мм и более.

В разделе 4.7 рассматривается макет МФ для синфазного и противофазного режимов. Макет состоит из двух печатных плат с одинаковыми геометрическими параметрами: $h_1=0,33$ мм, $h_2=20$ мм, $t=0,105$ мм, $s=2$ мм, $w=17$ мм и $l=75$ мм. Поперечное сечение структуры и фотография одной печатной платы представлены на рисунке 4.5, а схемы включения в синфазном и противофазном режимах – на рисунке 4.6.

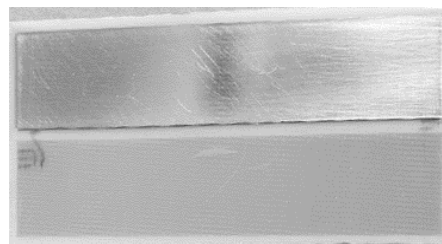
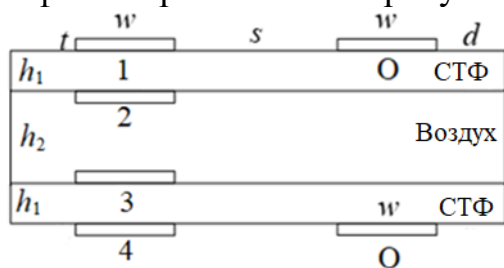


Рисунок 4.5 – Поперечное сечение МФ для синфазного и противофазного режимов (а) и фотография одной печатной платы (б)

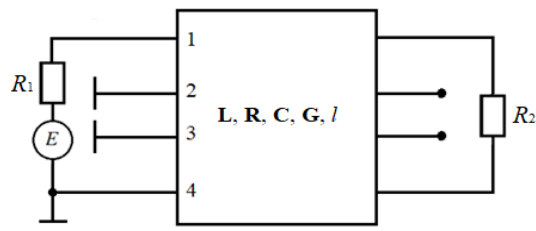
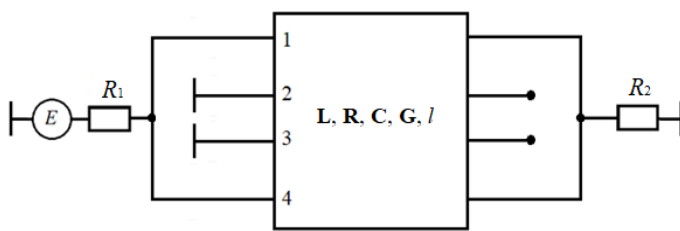


Рисунок 4.6 – Схема включения МФ в синфазном (а) и противофазном режимах (б)

С помощью осциллографа С9-11 измерены формы напряжения на выходе МФ для синфазного и противофазного режимов воздействия СКИ амплитудой 0,74 В и длительностью 0,45 нс. Результаты измерений представлены на рисунке 4.7. Из графиков видно, что СКИ эффективно ослабляется в синфазном (в 24,7 раза) и в противофазном (в 12,3 раза) режимах.

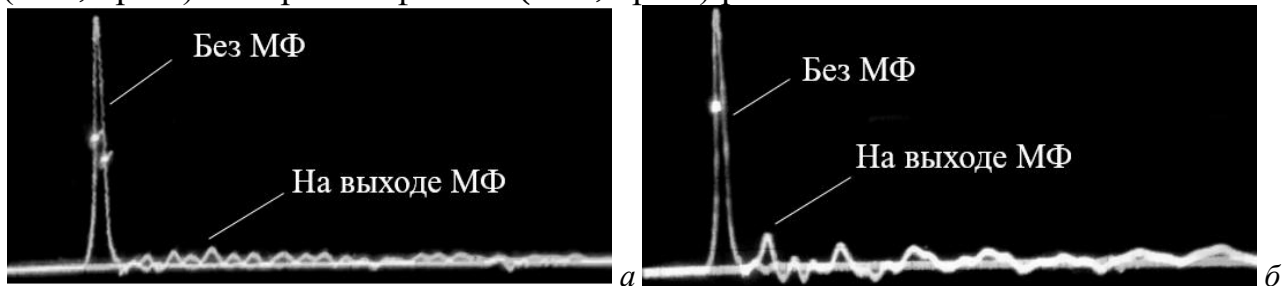


Рисунок 4.7 – Формы напряжения на выходе МФ для синфазного (а) и противофазного (б) режимов

5. Многокаскадное исполнение МФ и гибридные устройства защиты

В разделе 5.1 исследованы частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ с лицевой связью с разделением пассивного проводника на последовательность отрезков. С помощью электродинамического анализа исследовалась структура, поперечное сечение которой представлено на рисунке 4.1а, а схема включения – на рисунке 5.1. Рассмотрены структуры с числом отрезков пассивного проводника $N=1, 3, 5, 7$. Длина каждого отрезка выбиралась одинаковой (l/N), где $l=1$ м. Пассивный проводник включался в режиме КЗ-ХХ. Полученные частотные зависимости приведены на рисунке 5.1. Видно, что с увеличением количества отрезков пассивного проводника, увеличиваются крутизна спада частотной зависимости $|S_{21}|$, ширина полосы пропускания и полосы подавления. В таблице 5.1 представлены значения первой частоты среза МФ с разным количеством отрезков пассивного проводника.

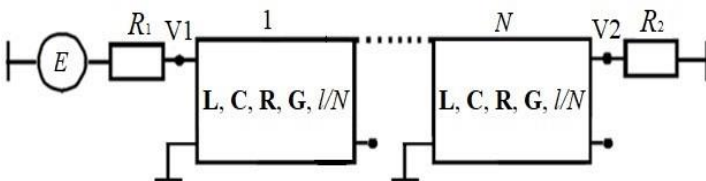


Рисунок 5.1 – Схема включения МФ с N отрезками пассивного проводника

Таблица 5.1 – Зависимость частоты среза от количества отрезков пассивного проводника

N	1	3	5	7
Длина отрезка, мм	1000	333	200	143
$f_{\text{ср}}$, МГц	15	51	78	106

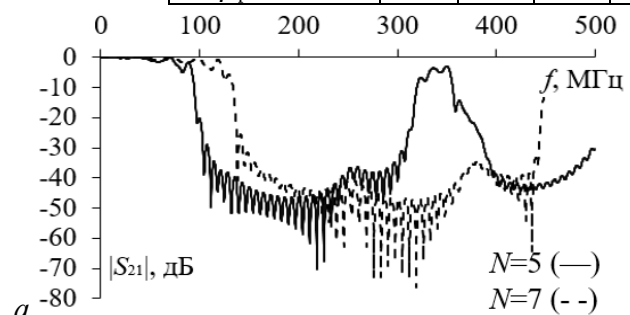
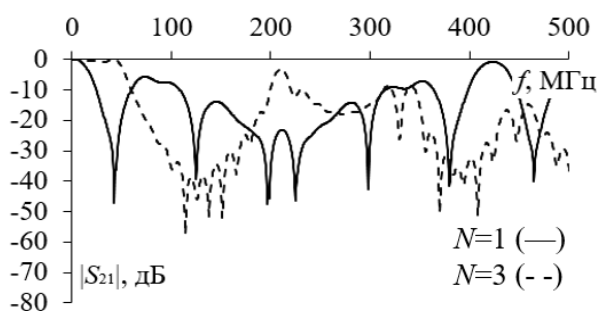


Рисунок 5.2 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ с лицевой связью с числом отрезков пассивного проводника $N=1, 3$ (а) и $N=5, 7$ (б)

Возможность увеличения крутизны спада частотной зависимости $|S_{21}|$ за счет увеличения количества отрезков пассивного проводника N также

подтверждена натурным экспериментом. Изготовлены прототипы ПП МФ с лицевой связью с разным числом отрезков пассивного проводника при общей длине МФ 280 мм. Структура имеет ширину проводников $w=9$ мм, расстояние между проводниками $s=2$ мм, толщину стеклотекстолита $h=1,5$ мм и толщину проводника $t=0,018$ мм. Результаты измерений частотных зависимостей $|S_{21}|$ показали, что при увеличении N увеличивается ширина полосы пропускания (от $f_{cp}=49$ МГц при $N=1$ до $f_{cp}=150$ МГц при $N=7$).

В разделе 5.2 исследованы характеристики гибридного исполнения помехоподавляющего фильтра для цепей электропитания и МФ с лицевой связью. Электрическая принципиальная схема фильтра и схема включения измерительной установки представлены на рисунке 5.3.

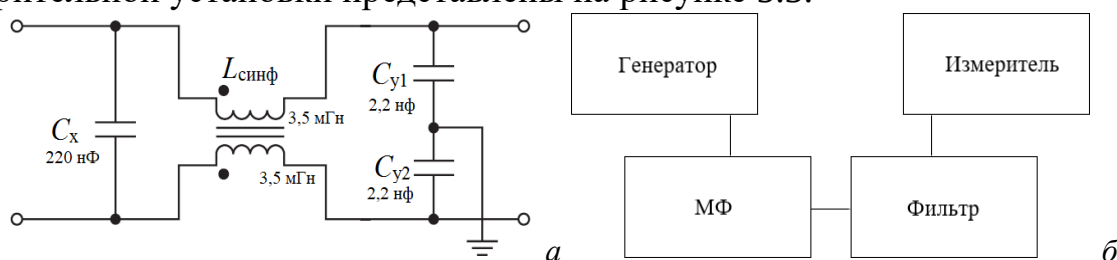


Рисунок 5.3 – Электрическая схема фильтра (а) и схема измерительной установки (б)

Результаты измерения в диапазоне частот от 10 до 3000 МГц показаны на рисунке 5.4. Видно, что в противофазном режиме при добавлении МФ к фильтру значительно улучшается вносимое затухание в частотном диапазоне до 1000 МГц. В синфазном режиме добавление МФ увеличивает вносимое затухание на всех частотах кроме диапазона 1240–1340 МГц. Таким образом, дополнительное подключение МФ к помехоподавляющим фильтрам улучшает подавление высокочастотных помех.

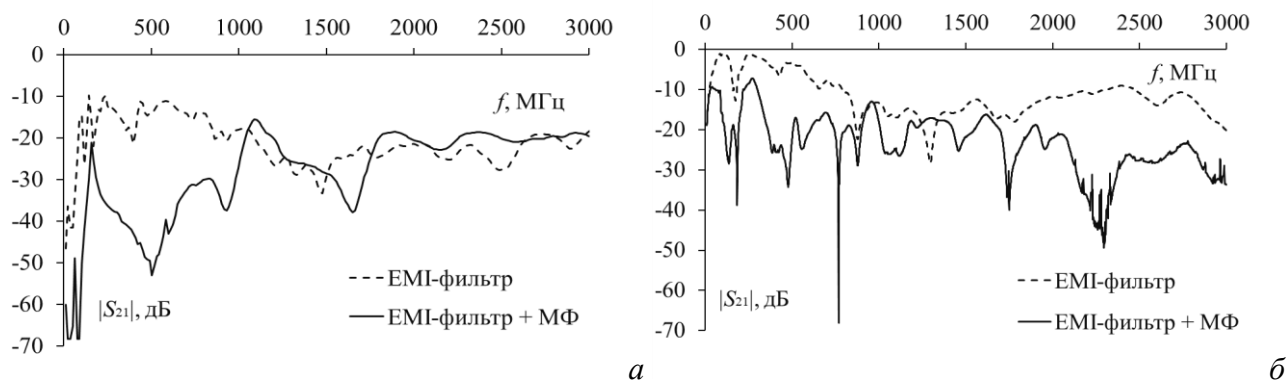


Рисунок 5.4 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ фильтра и совместного включения МФ и фильтра в противофазном (а) и синфазном (б) режимах

6. Использование результатов исследований

В разделе 6.1 описаны результаты, полученные автором в программе TALGAT 2017. В разделе 6.2 освещено использование опыта моделирования автора работы в учебном процессе ТУСУРа. В разделе 6.3 представлено использование методик моделирования, освоенных автором, для проектирования меандровых линий задержек. В разделе 6.4 кратко представлено использование результатов работы в различных НИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

В кандидатской диссертации решена научно-техническая задача совершенствования защиты РЭА с помощью МФ. Основные итоги:

1. Представлено сравнение результатов квазистатического и электродинамического подходов к моделированию МФ с торцевой связью и зеркально-симметричного МФ. Оценена корректность работы макетов МФ с помощью электродинамического анализа с учетом геометрических особенностей, таких как отверстия в печатной плате и меандры.

2. Оценен уровень излучаемой электромагнитной эмиссии МФ для защиты Fast Ethernet на соответствие стандарту MIL-STD-461G. Показана возможность уменьшения уровня излучений путем выравнивания длины полувитков МФ.

3. Предложено использование структур с периодическим профилем области связи проводников для увеличения разности задержек мод. Разработан макет МФ со встречно-штыревой структурой для защиты Fast Ethernet.

4. Разработаны макеты МФ с лицевой связью для защиты оборудования КА от СКИ, распространяющихся по СШЭП. Выполнена оценка влияния параметров конструкции на характеристики МФ с лицевой связью.

5. Исследовано влияние разделения пассивного проводника на отрезки и многокаскадности на крутизну спада АЧХ МФ. Исследована возможность улучшения подавления СКИ путем использования совместного включения МФ и помехоподавляющего фильтра на основе элементов с сосредоточенными параметрами

Опубликованы 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 3 публикации в журнале, индексируемом в WoS и Scopus, 3 доклада в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus, 12 докладов в трудах конференций, а также свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Использование результатов в АО «ИСС», ООО «Эремекс», ряде НИОКР и учебном процессе подтвердило их практическую значимость.

В диссертации представлены различные решения по совершенствованию МФ с лицевой и с торцевой связью. В соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» ВАК, в работе решена задача, имеющая значение для технических наук в области исследования «Разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения. Создание методик их расчета и основ проектирования», согласно п. 3 областей исследований паспорта специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Рекомендации

1. При проектировании макетов МФ, свернутых в меандр, рекомендуется выравнивать длину полувитков для уменьшения уровня излучаемой эмиссии.

2. Среди рассмотренных в работе МФ с периодическим профилем области связи проводников наибольшую разность задержек мод обеспечивает

спиралевидная структура, но рекомендуется использовать МФ со встречно-штыревой структурой проводников, так как его конструкция является более простой для исследования, оптимизации и изготовления.

3. Для защиты бортовой РЭА КА от СКИ в цепях питания рекомендуется использовать МФ с лицевой связью, так как он обеспечивает большую разность задержек мод, чем МФ с торцевой связью, и, как следствие, обладает меньшей массой и габаритами.

4. Для минимизации уровня перекрестных наводок между меандровыми линиями задержки рекомендуется использовать изгибы круглой формы без смещения одной из дорожек относительно других.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Аналогично оценке уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадных МФ, целесообразно выполнить такую оценку и для других макетов МФ, представленных в диссертации. Кроме того, целесообразно исследование МФ на керамической подложке, поскольку разработка таких устройств может позволить добиться высокого значения разности задержек мод. Наконец, целесообразен ряд исследований, обеспечивающих возможность расширенного использования всех разработанных устройств на практике.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Куксенко, С.П. Оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100Base-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажибеков, Т.Т. Газизов // Технологии электромагнитной совместимости, 2017. – №1(60). – С. 13–20.

2. Хажибеков, Р.Р. Моделирование модального фильтра с учетом потерь / Р.Р. Хажибеков, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Сибирский журнал науки и технологий.–2018.–№ 1. С. – 44–48.

3. Хажибеков, Р.Р. Исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с пассивным проводником в виде последовательности отрезков линий передачи // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2019. – № 2(37). – С. 31–35.

Публикации в журнале, индексируемом в WoS и Scopus

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

5. Khazhibekov, R.R. Radiated emissions comparison of seven-stage modal filter constructions for Ethernet 100Base-T network protection / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky // Journal of physics: conference series /, 2018. No 1015. – P. 1–7.

6. Khazhibekov, R.R. Developing a modal filter prototype to protect spacecraft busbar against ultrashort pulses / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky, Y. S. Zhechev, V. P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series, 2019. – No 560. – P. 1–6.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

7. Khazhibekov R. Study of the characteristics of a modal filter with different periodic profiles of the coupling region / R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky, M.V. Khramtsov // 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 18–24 September 2017. – P. 506–509.

8. Khazhibekov R. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s Ethernet equipment protection / R. Khazhibekov, A. Zabolotsky // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2019). – Tomsk, Russia, April 18–20, 2019. – P. 1–4.

9. Khazhibekov R.R. Modal filter for spacecraft busbar protection against ultrashort pulses// 20th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2019), Erlagol (Russia). – June 29 – July 3, 2019. – P. 88–91.

Доклады (тезисы) в трудах других конференций

10. Куксенко С.П. Оценка уровня излучаемых эмиссий семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100Base-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажибеков/ // Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 25-27 ноября 2016 г. Том 1. – С 208–211.

11. Хажибеков Р.Р. Особенности обучения студентов моделированию задач электромагнитной совместимости / Р.Р. Хажибеков, С.П. Куксенко // Международная научно-методическая конференция «Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования». – Томск, 1–2 февраля 2018 г. – С. 59–60.

12. Хажибеков Р.Р. Изменение задержки нечетной моды с помощью периодического профиля области связи проводников модального фильтра // Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск. – 16–18 мая 2017 г. – Том 3. – С. 92–95.

13. Хажибеков Р.Р. Сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирований модального фильтра с учетом потерь / Р.Р. Хажибеков А.М. Заболоцкий // IV Научно-техническая конференция молодых специалистов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва. – Железногорск, 23–26 августа 2017 г. – С. 117–119.

14. Хажибеков Р.Р. Оптимизация параметров встречно-штыревой топологии модального фильтра для Ethernet 100 Мбит/с // Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск, 29 ноября – 1 декабря 2017 г. – Часть 2. – С 10-12.

15. Хажибеков Р.Р. Electrodynamic simulation of the ultrashort pulse decomposition in the seven-stage modal filters layouts // Научная сессия ТУСУР–2018: материалы Международной научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых. – Томск, 16–18 мая 2018 г. – Том 4. – С. 202–205.

16. Куулар Ш.В. Минимизация высокочастотных искажений модального фильтра в диапазоне частот до 2 ГГц / Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018». – Томск, 22–24 мая 2018 г. – Сборник статей. – Ч. 2. – С. 260–263.

17. Ромашов И.П. Моделирование помехоподавляющего фильтра источника питания персонального компьютера / И.П. Ромашов, Р.Р. Хажибеков // Научная сессия ТУСУР–2018: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 16–18 мая 2018 г. – Часть 2. – С. 252–254.

18. Куулар Ш.В. Моделирование модального фильтра для защиты входных цепей пикосекундного локатора / Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков, Е.Б. Черникова // Материалы XIII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября 2018 г. – Сборник статей. – Ч. 1. – С. 318–321.

19. Заболоцкий А.М. Результаты разработки модального фильтра с лицевой связью для защиты силовой шины электропитания космических аппаратов от сверхкоротких импульсов / А.М. Заболоцкий, Р.Р. Хажибеков // Материалы региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность от идеи до внедрения». – Томск, 15 октября – 30 ноября 2018 г. – С. 598–600.

20. Куулар Ш.В. Сравнение вариантов реализации полосового фильтра для пикосекундного локатора / Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019», Томск, Россия, 22–24 мая 2019. – Сборник избранных статей. – Ч. 1. – С. 244–246.

21. Куулар Ш.В. Разработка гибридного полосового фильтра для защиты входных цепей пикосекундного локатора / Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019». – Томск, Россия. – 22–24 мая 2019. – Сборник избранных статей. – Ч. 1. – С. 240–243.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611481. TALGAT 2017. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 23 чел. Заявка № 2017663209. Дата поступления 13 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.