

На правах рукописи



**Костелецкий Валерий Павлович**

**Устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры  
от сверхкоротких импульсов  
в синфазном и дифференциальном режимах**

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

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2022

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

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

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

**Мырова Людмила Ошеровна**,  
доктор технических наук, профессор,  
Российский научно-исследовательский  
институт радио имени М.И. Кривошеева

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

Защита состоится 4 октября 2022 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/jnnaqfun>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических  
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Развитие радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к повсеместному использованию электроники, в том числе в критичных отраслях, например, военной, атомной, медицинской и космической. Эксплуатация РЭА в неблагоприятной электромагнитной обстановке и без возможности его обслуживания может привести к выходу из строя РЭА. В этой связи, предъявляются повышенные требования к надежности РЭА, и растет важность обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). С ростом быстродействия увеличивается верхняя частота спектра рабочих сигналов, а с миниатюризацией и снижением уровня питающих напряжений уменьшается запас помехоустойчивости. При этом РЭА часто работает в ограниченном пространстве, что увеличивает плотность компоновки. Все эти факторы ухудшают ЭМС РЭА. Помимо техногенного ухудшения ЭМС, есть вероятность преднамеренных электромагнитных воздействий специальными средствами.

Уязвимость РЭА к помеховым воздействиям актуализирует такое направление ЭМС как защита от кондуктивных помех, которые, в свою очередь, могут обладать узкой и широкой полосой спектра. Одним из опасных видов помех являются сверхширокополосные импульсы. Отдельно стоит выделить сверхкороткие импульсы (СКИ) наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Для борьбы с кондуктивными СКИ используют электрические фильтры на элементах с сосредоточенными параметрами. Однако спектр СКИ перекрывает широкий диапазон частот, вследствие чего значительная его часть преодолевает традиционные схмотехнические и конструктивные средства защиты от помех. Распространяясь по электрическим цепям, СКИ, даже не обладая большой мощностью, способны ухудшить функционирование РЭА, привести к ложным срабатываниям, изменению электрических параметров из-за электрического пробоя диэлектриков и полупроводников и даже повреждению. Между тем импульсные помехи распространяются как в синфазном, так и в дифференциальном режимах, а требования к уровням таких помех регламентированы стандартами по ЭМС. Поэтому необходимы надежные устройства защиты способные работать в дифференциальном и синфазном режимах. Их конструктивные особенности должны позволять работу в экстремальных климатических условиях, а также иметь простую конструкцию для легкой реализации в рамках типового технологического процесса для печатных плат. Поэтому, актуальна разработка новых устройств защиты от СКИ, работающих в дифференциальном и синфазном режимах.

### **Степень разработанности темы**

Проблема ЭМС ежегодно обсуждается на международных конференциях Азии, Европы и Америки, например, ASIAEM, AMEREM, EMC+SIPI. Значительный вклад в ЭМС внесли Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, А.В. Разумов, Ю.В. Парфенов, В.Е. Фортов, F. Sabath, S. Vass, J.L. ter Haseborg, F. Rachidi, W. Radasky. Исследованиями преднамеренных воздействий и их последствий занимаются Л.В. Баталов, А.А. Борисов, С.И. Макаренко, Э.Н. Фоминич. Исследованиями в области защиты РЭА от СКИ занимаются З.М. Гизатуллин,

Р.В. Киричек, А.В. Ларионенко, Л.О. Мырова, К.Ю. Сахаров, И.А. Фомина и др. Исследованиями связанных линий передачи и импульсных технологий занимаются Б.И. Авдоченко, Б.А. Беляев, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов, А.М. Сержантов, А.Н. Сычев и др. Известны защитные устройства, применяемые для ослабления СКИ, принцип работы которых основан на модальной фильтрации. Ее активно исследуют А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Е.Б. Черникова и др.

Модальные фильтры (МФ) характеризуются неограниченным сроком эксплуатации и возможностью стабильно функционировать в экстремальных климатических условиях. Между тем актуален поиск возможности их функционирования в дифференциальном и синфазном режимах, а также уменьшения их массогабаритных характеристик по сравнению с существующими устройствами защиты. Так, в космической отрасли есть дополнительные требования. Например, защитное устройство для силовой шины электропитания космического аппарата должно быть устойчиво к значительному изменению температур, длительным перегрузкам, сильным вибрациям, влажности и радиации. Надо учитывать и уровень пробивного напряжения, номинальный ток, массогабаритные характеристики.

**Цель работы** – создать устройства защиты РЭА от СКИ в синфазном и дифференциальном режимах. Для её достижения надо решить **задачи**:

1. Выполнить обзор устройств защиты РЭА.
2. Исследовать структуры МФ, позволяющих обеспечить защиту в дифференциальном и синфазном режимах.
3. Выполнить исследование и разработку гибридного фильтра для силовой шины электропитания космического аппарата.

#### **Научная новизна**

1. Сформулированы аналитические математические модели в виде конечных комбинаций элементарных функций для вычисления частотных и временных откликов двухпроводной линии, отличающиеся учетом асимметрии проводников, и четырехпроводной линии, отличающиеся учетом попарной симметрии проводников и дифференциального и синфазного режимов.

2. Предложен подход к защите радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах за счет применения модальных фильтров, отличающихся использованием центральной симметрии проводников, экранирующего корпуса, керамической подложки и каскадирования.

3. Впервые предложен гибридный фильтр для силовой шины электропитания космического аппарата, отличающийся совместным использованием помехоподавляющего и модального фильтров, работающий в дифференциальном и синфазном режимах.

#### **Теоретическая значимость**

1. Изучено влияние расположения проводников на ослабление СКИ в МФ, работающем в дифференциальном и синфазном режимах.

2. Получены зависимости коэффициента ослабления МФ от расстояний между печатными платами МФ и до экранирующего корпуса.

3. Оценено влияние температуры на коэффициент ослабления и задержки МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах.

4. Получена зависимость коэффициента ослабления МФ от толщины проводников, не подвергающихся токовым нагрузкам.

5. Оценено ослабление МФ в дифференциальном и синфазном режимах при разных формах входного воздействия.

6. Показана зависимость вносимого затухания МФ на керамической подложке от длительности импульса.

7. Изучено влияние компоновки индуктивных элементов помехоподавляющего фильтра на его полосу пропускания в дифференциальном и синфазном режимах.

### **Практическая значимость**

1. Внедрен комплекс технических решений для обеспечения ЭМС, конструкторских решений на основе использования пассивных помехозащитных устройств и устройств конструктивного исполнения, позволяющий сохранять работоспособность РЭА в условиях сложной электромагнитной обстановки, в ООО «ТРЭМ Инновации». (Акт внедрения).

2. Внедрены результаты исследования гибридного фильтра для защиты силовой шины электропитания космического аппарата в АО «ИСС», г. Железногорск. (Акт внедрения).

3. Внедрены результаты теоретического анализа с использованием выражений в виде конечных комбинаций элементарных функций и моделирования МФ, работающих в дифференциальном и синфазном режимах, в учебный процесс РТФ ТУСУР, г. Томск. (Акт внедрения).

4. Предложено совершенствование МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах, за счет применения керамических материалов.

5. Разработаны макеты помехозащитных устройств, обеспечивающих защиту в дифференциальном и синфазном режимах: экранированных, с горизонтальным и вертикальным расположением каскадов; на керамической подложке; гибридного, для защиты силовой шины электропитания космического аппарата от кондуктивных помех.

**Методология и методы исследования:** применены теория линий передачи, моделирование, основанное на схемотехническом, квазистатическом и электродинамическом подходах, лабораторный эксперимент на базе скалярного и векторного анализаторов цепей, а также осциллографа.

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

1. Предложенные математические модели в виде конечных комбинаций элементарных функций позволяют вычислить частотные и временные отклики двухпроводной линии с асимметрией проводников и четырехпроводной линии с попарной симметрией проводников в дифференциальном и синфазном режимах.

2. Предложенный подход к защите радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов позволяет разработать устройства защиты на основе модальных фильтров с центральной симметрией проводников, экранирующим

корпусом, керамической подложкой и каскадированием, уменьшающие в дифференциальном и синфазном режимах в 7,8 – 11,9 раза амплитуду импульса длительностью 300 пс.

3. Разработанный гибридный фильтр для силовой шины электропитания космического аппарата позволяет ослабить сверхкороткий импульс длительностью 300 пс в 11,9 раза в дифференциальном и 5,8 раза в синфазном режимах.

**Достоверность результатов** основана на согласованности результатов схемотехнического, квазистатического и электродинамического моделирования, лабораторного эксперимента, выполненного на сертифицированном оборудовании, данных других авторов и корректном использовании теории линий передачи и численных методов. Теоретические результаты подтверждены их согласованностью с результатами моделирования. Реализуемость предложенных защитных устройств на практике подтверждена макетированием и результатами эксперимента.

### **Использование результатов исследований**

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

2. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения ЭМС РЭА 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 молодых российских ученых, проект № МД-365.2018.8, 2018–2019 г.

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

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

6. НИР «Моделирование распространения сверхкоротких импульсов в многопроводных линиях передачи для решения задач проектирования РЭА с учётом ЭМС» №19-37-51017, 2020–2021 г.

7. НИР «Разработка математического обеспечения и программного модуля для моделирования радиотехнических характеристик антенного элемента» по договору №ДП2021-60 от 15 апреля 2021 г.

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

### **Апробация результатов**

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: ФЦП ИР, гранта Президента РФ, РНФ, госзаданий,

РФФИ, на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа, на назначение стипендии Правительства РФ.

Результаты представлялись в материалах следующих конференций: Int. Sib. conf. on control and communications (SIBCON-2017), г. Астана, 2017 г.; International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Алтай, 2020, 2022 г.; межд. научно-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2017, 2020, 2021 г.; межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2019, 2020, 2021 г.; межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2018, 2021 г.; межд. Конф. «Авиация и космонавтика–2019», г. Москва, 2019 г.; межрег. научн. конф. «Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи», г. Тула, 2020 г.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 36 работах в т.ч. 3 работах без соавторов: 5 статей в журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале из Q1 Scopus, 5 публикаций в других журналах, индексируемых в WoS и Scopus, 4 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus, 13 докладов в трудах отечественных конференций, 4 тезисов в трудах отечественных конференций, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 2 патента на изобретение.

**Личный вклад.** Результаты из положений, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично. Результаты электродинамического моделирования получены с Жечевым Е.С. Реализация макетов помехоподавляющих фильтров выполнена совместно с Лакоза А.М. Аналитические математические модели для вычисления временных откликов получены совместно с Черниковой Е.Б. Отдельные результаты исследования получены совместно с соавторами публикаций. Непосредственный вклад автора состоит в разработке приведенных в работе устройств защиты, а именно, обзоре, моделировании, обработке и интерпретации данных моделирования и экспериментальных исследований, а также написании публикаций.

**Структура и объём диссертации.** В состав диссертации входят введение, 3 раздела, заключение, список используемых источников из 195 наименований, приложение из 18 с. Объём диссертации с приложением – 209 с., в т.ч. 146 рисунков и 20 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. Защита радиоэлектронной аппаратуры от кондуктивных помех: обзор**

В данном разделе представлен обзор, в котором рассмотрены: актуальность обеспечения ЭМС; нарушения функционирования РЭА в результате воздействия СКИ; пассивные и гибридные устройства защиты от кондуктивных помех; режимы распространения помех, способы их измерения и формулы для оценки эффективности помехоподавляющих фильтров; модальный анализ многопроводных линий передачи; подходы и программы для моделирования, а также сформулированы цель и задачи работы.

### **2. Модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах**

В данном разделе представлены результаты исследования МФ, защищающего от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах. Для его

выполнено объединение в одну конструкцию двух структур МФ с лицевой связью (рисунок 2.1а), в которой опорные проводники соединены между собой на ближнем и дальнем концах. Поперечное сечение такого МФ представлено на рисунке 2.1б, а схема соединений – на рисунке 2.1в.

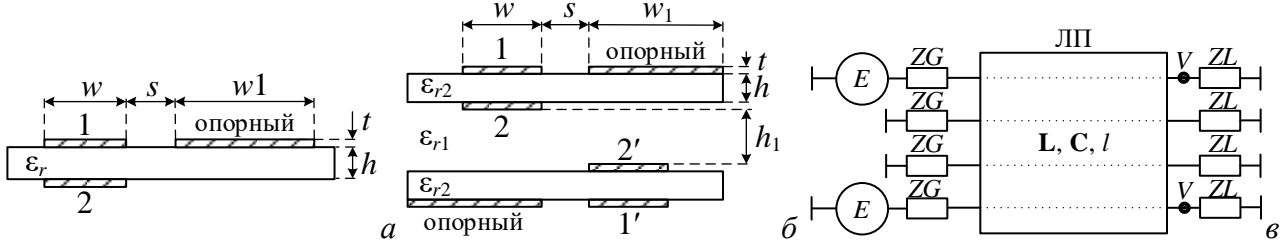


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения 2-проводного МФ (а), 4-проводного МФ (б) и схема электрических соединений 4-проводного МФ (в)

Для теоретического анализа разработаны аналитические математические модели в виде конечных комбинаций элементарных функций для вычисления частотных и временных откликов на выходе 2- и 4-проводных структур с модальным разложением. Аналитические модели получены на основе модального анализа в спектральной области, затем с помощью преобразования Лапласа – во временной области. Для 2-проводной структуры, модели получены при условиях, что у проводников 1 и 2 импедансы со стороны генератора равны  $ZG$ , а нагрузки –  $ZL$ . Источник э.д.с.  $E$  подключается к первому проводнику, который является активным, а второй – пассивным.  $Z_{e,o}$  и  $\gamma_{e,o}$  – импедансы и коэффициенты распространения четной и нечетной мод, аналитическая модель для вычисления частотного отклика в первом  $V_1(x, \omega)$  и втором  $V_2(x, \omega)$  проводниках двухпроводной асимметричной структуры показана в (2.1). Из (2.1) получены модели для вычисления  $S_{21}$  (2.2) и временного отклика в первом  $V_1(x, t)$  и втором  $V_2(x, t)$  проводниках (2.3).

$$V_{1,2}(x, \omega) = \frac{e^{-\gamma_e x} + \rho_{Le} e^{-\gamma_e x}}{1 - \rho_{Le} \rho_{Ge} e^{-2\gamma_e x}} \frac{R\pi}{R\pi - Rc} P_e E(\omega) \pm \frac{e^{-\gamma_o x} + \rho_{Lo} e^{-\gamma_o x}}{1 - \rho_{Go} \rho_{Lo} e^{-2\gamma_o x}} \frac{Rc}{Rc - R\pi} P_o E(\omega), \quad (2.1)$$

$$S_{21} = \frac{e^{-\gamma_e x} + \rho_{Le} e^{-\gamma_e x}}{1 - \rho_{Le} \rho_{Ge} e^{-2\gamma_e x}} \frac{R\pi}{R\pi - Rc} 2P_e + \frac{e^{-\gamma_o x} + \rho_{Lo} e^{-\gamma_o x}}{1 - \rho_{Go} \rho_{Lo} e^{-2\gamma_o x}} \frac{Rc}{Rc - R\pi} 2P_o, \quad (2.2)$$

$$V_{1,2}(x, t) = (1 + \rho_{Le}) \frac{R\pi}{R\pi - Rc} P_e \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{Le} \rho_{Ge})^m E(t - (2m+1)x\tau_e) \pm \pm (1 + \rho_{Lo}) \frac{Rc}{Rc - R\pi} P_o \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{Lo} \rho_{Go})^m E(t - (2m+1)x\tau_o). \quad (2.3)$$

$$\text{где } P_o = \frac{Z_o}{Z_o + ZG}, P_e = \frac{Z_e}{Z_e + ZG}, \rho_{Go} = \frac{ZG - Z_o}{ZG + Z_o}, \rho_{Ge} = \frac{ZG - Z_e}{ZG + Z_e}, \rho_{Lo} = \frac{ZL - Z_o}{ZL + Z_o}, \rho_{Le} = \frac{ZL - Z_e}{ZL + Z_e}.$$

Примеры  $|S_{21}|$  и формы напряжения в конце активного проводника асимметричной 2-проводной структуры, длиной  $l=1$  м, вычисленные с помощью аналитических математических моделей показаны на рисунке 2.2. При вычислении  $|S_{21}|$   $ZG=ZL=50$  Ом, а временного отклика  $ZG=50$ ,  $ZL=75$  Ом.



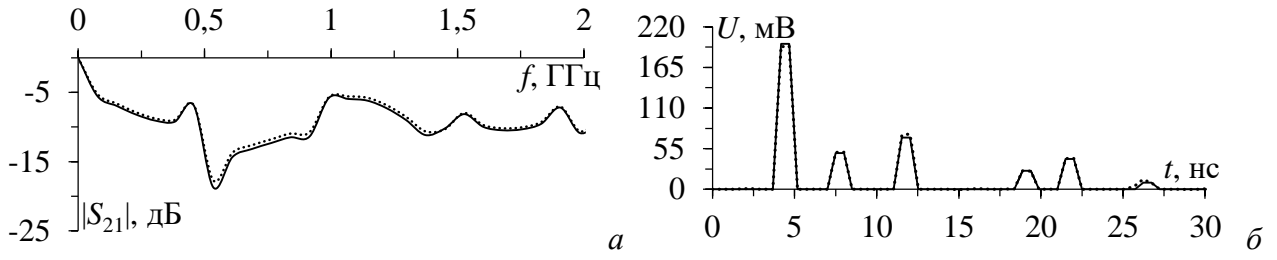


Рисунок 2.2 –  $|S_{21}|$  (а), полученная по аналитической (—) и алгоритмической (···) моделям; формы напряжения на выходе (б), полученные по аналитической модели (—) и в ПО TALGAT (···), для асимметричной 2-проводной структуры

Модели для вычисления частотного и временного откликов 4-проводной структуры с попарной симметрией проводников получены при равенстве импедансов как со стороны генератора ( $ZG_1=ZG_2=ZG_3=ZG_4$ ), так и нагрузки ( $ZL_1=ZL_2=ZL_3=ZL_4$ ). Источник э.д.с.  $E$  подключается к двум проводникам (1 и 1'), которые являются активными, а два оставшихся (2 и 2') – пассивными;  $Zm_{1,2,3,4}$  и  $\gamma_{1,2,3,4}$  – импедансы и коэффициенты распространения мод.

$$V_{d1,2}(x, \omega) = \frac{e^{-\gamma_3 x} (1 + \rho_{L3})}{1 - \rho_{G3} \rho_{L3} e^{-2\gamma_3 x}} \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} P_3 E(\omega) \pm \frac{e^{-\gamma_4 x} (1 + \rho_{L4})}{1 - \rho_{G4} \rho_{L4} e^{-2\gamma_4 x}} \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} P_4 E(\omega), \quad (2.4)$$

$$V_{c1,2}(x, \omega) = \frac{e^{-\gamma_1 x} (1 + \rho_{L1})}{1 - \rho_{G1} \rho_{L1} e^{-2\gamma_1 x}} \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} P_1 E(\omega) \pm \frac{e^{-\gamma_2 x} (1 + \rho_{L2})}{1 - \rho_{G2} \rho_{L2} e^{-2\gamma_2 x}} \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} P_2 E(\omega), \quad (2.5)$$

где  $P_i = \frac{Zm_i}{Zm_i + ZG}$ ,  $\rho_{Li} = \frac{ZL - Zm_i}{ZL + Zm_i}$ ,  $\rho_{Gi} = \frac{ZG - Zm_i}{ZG + Zm_i}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Из (2.4) и (2.5) получены аналитические математические модели для вычисления  $S_{21}$  (2.6, 2.7) и временного отклика (2.8, 2.9) на активных ( $Vd_1(x, t)$ ,  $Vc_1(x, t)$ ) и пассивных ( $Vd_2(x, t)$ ,  $Vc_2(x, t)$ ) проводниках в дифференциальном и синфазном режимах:

$$S_{d21} = \frac{e^{-\gamma_3 x} (1 + \rho_{L3})}{1 - \rho_{G3} \rho_{L3} e^{-2\gamma_3 x}} \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} 2P_3 + \frac{e^{-\gamma_4 x} (1 + \rho_{L4})}{1 - \rho_{G4} \rho_{L4} e^{-2\gamma_4 x}} \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} 2P_4, \quad (2.6)$$

$$S_{c21} = \frac{e^{-\gamma_1 x} (1 + \rho_{L1})}{1 - \rho_{G1} \rho_{L1} e^{-2\gamma_1 x}} \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} 2P_1 + \frac{e^{-\gamma_2 x} (1 + \rho_{L2})}{1 - \rho_{G2} \rho_{L2} e^{-2\gamma_2 x}} \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} 2P_2, \quad (2.7)$$

$$V_{d1,2}(x, t) = (1 + \rho_{L3}) \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} P_3 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L3} \rho_{G3})^m E(t - (2m+1)x\tau_3) \pm \pm (1 + \rho_{L2}) \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} P_4 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L4} \rho_{G4})^m E(t - (2m+1)x\tau_4), \quad (2.8)$$

$$V_{c1,2}(x, t) = (1 + \rho_{L1}) \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} P_1 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L1} \rho_{G1})^m E(t - (2m+1)x\tau_1) \pm \pm (1 + \rho_{L2}) \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} P_2 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L2} \rho_{G2})^m E(t - (2m+1)x\tau_2), \quad (2.9)$$

где  $N$  – число переотражений,  $\tau_{1,2,3,4}$  – погонные задержки мод.

Для примера, вычисление  $|S_{21}|$  и временного отклика (рисунок 2.3) показаны в синфазном режиме на структуре МФ (рисунок 2.1б). Вычисленные с помощью аналитических моделей амплитуды и задержки импульсов совпадают с результатами вычисления откликов в ПО TALGAT.

Отклонения амплитуд в 2-проводной структуре составили  $\pm 0,83\%$ , а 4-проводной –  $\pm 2,66\%$  в дифференциальном и  $\pm 2,47\%$  синфазном режимах.

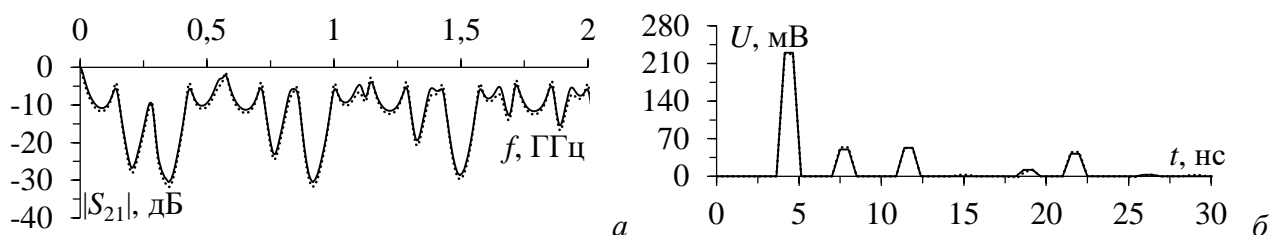


Рисунок 2.3 –  $|S_{21}|$  (а), полученная по аналитической (—) и алгоритмической (···) моделям; формы напряжения на выходе (б), полученные по аналитической модели (—) и в ПО TALGAT (···) для асимметричной 4-проводной структуры в синфазном режиме

Таким образом, предложены математические модели в виде конечных комбинаций элементарных функций для вычисления частотных и временных откликов 2-проводной линии с асимметрией проводников и 4-проводной линии с попарной симметрией проводников в дифференциальном и синфазном режимах.

Далее выполнены выбор и обоснование структуры поперечного сечения МФ. Определены зависимости коэффициента ослабления от расстояния между структурами. Проанализировано влияние электрического экрана и расположения проводников на коэффициент ослабления. Оценено влияние изменения температуры на характеристики МФ. Выполнено квазистатическое моделирование МФ с уменьшенной массой. Представлен сравнительный анализ однокаскадного и двухкаскадных МФ. Приведены результаты квазистатического моделирования при воздействии типовыми СКИ, а также экранирующих свойств корпуса.

Для МФ, из рисунка 2.1а выбраны оконечные нагрузки пассивного проводника для максимального ослабления. Моделирование, результаты которого сведены в таблицу 2.1, выполнено при разных оконечных нагрузках: сопротивление ( $R$ ), короткое замыкание ( $KЗ$ ), холостой ход ( $XX$ ). Видно, что наибольший коэффициент ослабления 8,92 раза достигнут при  $XX-KЗ$ . При этом  $R = 26,18 \text{ Ом}$ , а схема показана на рисунке 2.4а.

Таблица 2.1 – Значения  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $U_1/U_{\text{ВЫХ}}$  при разных нагрузках пассивного проводника

Варианты	$U_{\text{ВЫХ}}$ , мВ	$U_1/U_{\text{ВЫХ}}$
$R - R$	86	5,81
$XX - XX$	283	1,76
$KЗ - KЗ$	282	1,77
$KЗ - XX$	59	8,47
$XX - KЗ$	56	8,92

Для МФ из рисунка 2.1б вариант оконечных нагрузок пассивных проводников в каждой из структур также принят  $XX-KЗ$  (рисунок 2.4б). МФ размещен в экранирующем корпусе (рисунок 2.5а) для минимизации влияния внешних электромагнитных связей, а также применено каскадирование МФ (рисунок 2.5б) для уменьшения амплитуды импульсов разложения. При разработке макета МФ (рисунок 2.5в) взяты параметры:  $w = 3 \text{ мм}$ ,  $w_1 = 6 \text{ мм}$ ,  $g = 4,2 \text{ мм}$ ,  $s = 0,5 \text{ мм}$ ,  $t = 35 \text{ мкм}$ ,  $h = 430 \text{ мкм}$ ,  $h_1 = 3 \text{ мм}$ ,  $h_2 = 6 \text{ мм}$ ,  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = 4,7$ . Они получены в результате эвристического поиска по критерию минимизации амплитуды на выходе МФ с учетом технологических возможностей изготовителя.

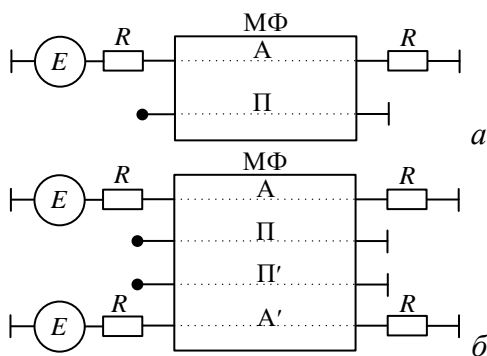


Рисунок 2.4 – Схема соединений МФ с лицевой связью (а) и МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах (б)

Макет 2-каскадного МФ с горизонтальным расположением каскадов с размерами  $335 \times 25 \times 22$  мм показан на рисунке 2.5г. Электрический экран с толщиной стенок 2 мм изготовлен из алюминиевого сплава марки Д16Т. Для измерений во временной области использован осциллограф вычислительный комбинированный С9-11. Схема соединений функциональных модулей изображена на рисунке 2.6а. На выходе формователя получается импульс с длительностью 300 пс по уровню 0,5 и э.д.с. 500 мВ (рисунок 2.6б).

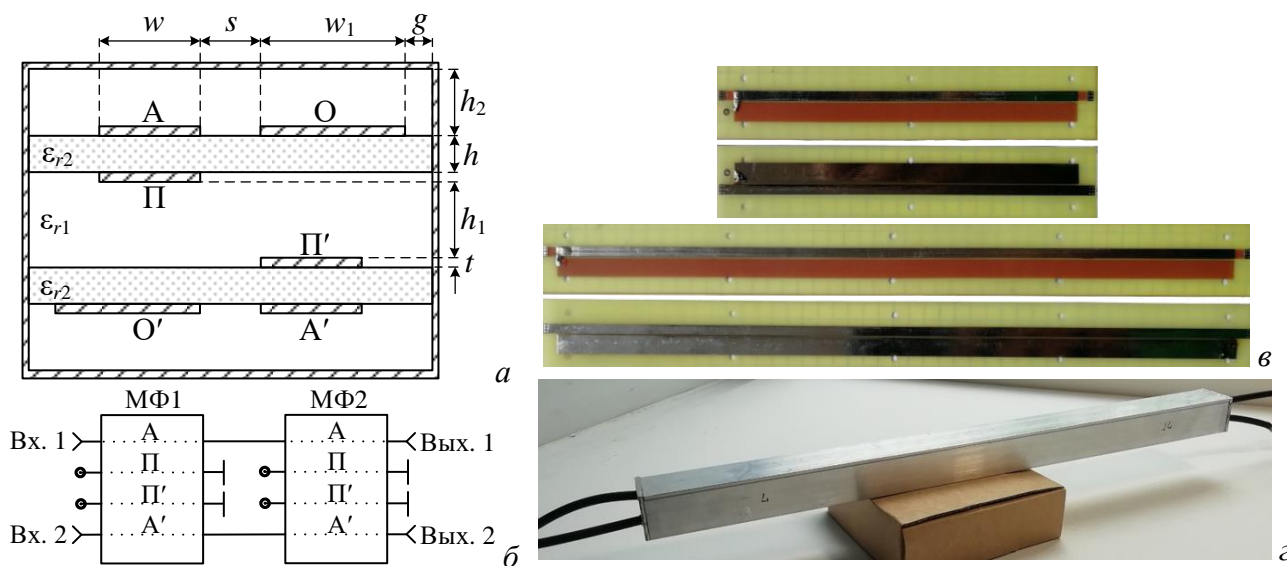


Рисунок 2.5 – Поперечное сечение (а), структурная схема (б), ПП (е) и макет (з) двухкаскадного экранированного МФ

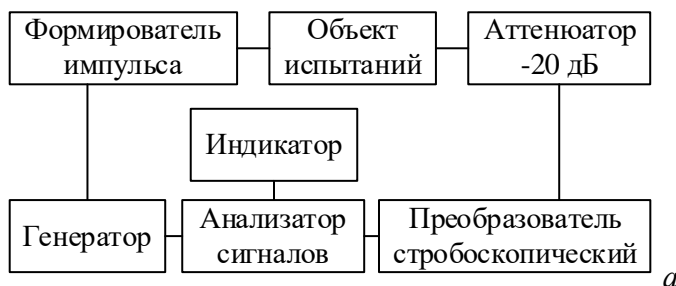


Рисунок 2.6 – Схема для измерений во временной области (а) и э.д.с. воздействия (б)

Формы выходного напряжения в результате эксперимента приведены на рисунке 2.7. Значения  $U_{\max}$  составляют 32 мВ в дифференциальном режиме и 21 мВ – в синфазном. Таким образом, достигается ослабление 7,8 раза в дифференциальном и 11,9 раза в синфазном режимах.

Для совершенствования характеристик МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах, использована подложка из керамического материала. Поперечное сечение 2-проводного МФ показано на рисунке 2.8а, где  $d=2$  мм,  $w=15,5$  мм,  $t=0,3$  мм,  $s=2$  мм,  $h=0,63$  мм,  $l=47$  мм,  $\text{tg}\delta=4 \cdot 10^{-4}$ ,  $\epsilon_r=10$ .

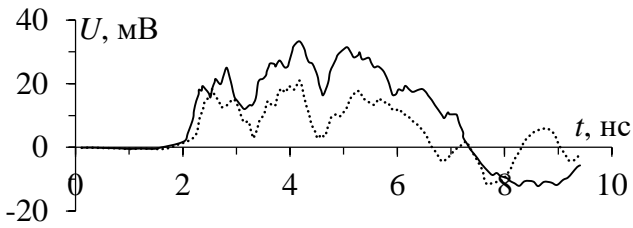


Рисунок 2.7 – Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (····) режимах

Принято  $R=50$  Ом, а на концах пассивного проводника ХХ-КЗ. Вычислены коэффициенты емкостной  $K_C=0,989$ , индуктивной  $K_L=0,945$  и общей связи  $K=0,975$ . Разработана конструкция МФ (рисунок 2.8б) и изготовлен макет (рисунок 2.8в).

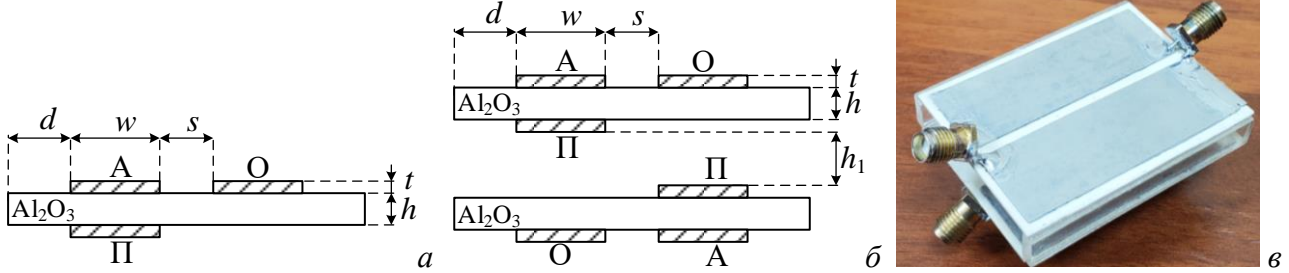


Рисунок 2.8 – Поперечные сечения МФ на керамической подложке с лицевой связью (а) и МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах (б), макет (в)

При изготовлении макета использован диэлектрик из  $Al_2O_3$  с  $\epsilon_r = 9,9 \pm 0,1$  и  $tg\delta = 0,0004$ . Значения параметров:  $d=2$  мм,  $w = 15,5$  мм,  $s = 2$  мм,  $t = 0,3$  мм,  $h = 630$  мм. Длина – 47 мм. Для измерений МФ на керамической подложке использован векторный анализатор цепей «Панорама» P4226. S-параметры измерены в диапазоне от 10 МГц до 18 ГГц. В качестве воздействия в ПО ADS взят сигнал из рисунка 2.6б. Показаны  $|S_{21}|$  (рисунок 2.9) и формы сигналов на выходе (рисунок 2.10) МФ на керамической подложке, полученные при электродинамическом моделировании и эксперименте.

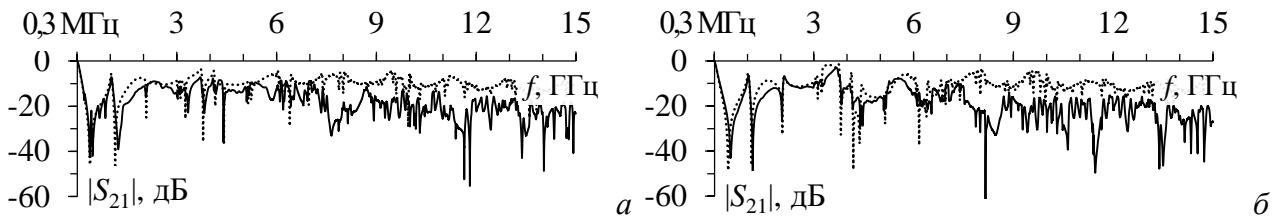


Рисунок 2.9 –  $|S_{21}|$  МФ на керамической подложке в дифференциальном (а) и синфазном (б) режимах, при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (····)

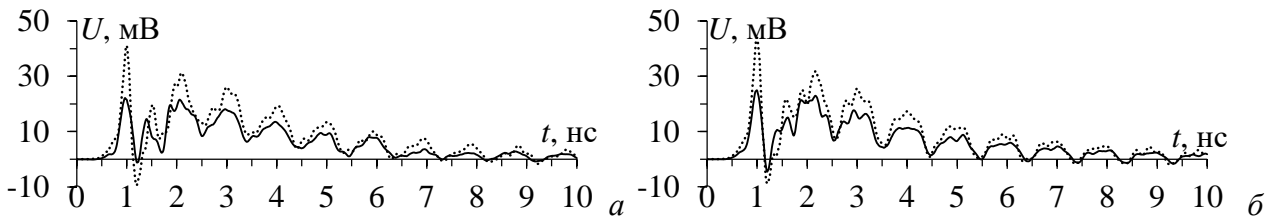


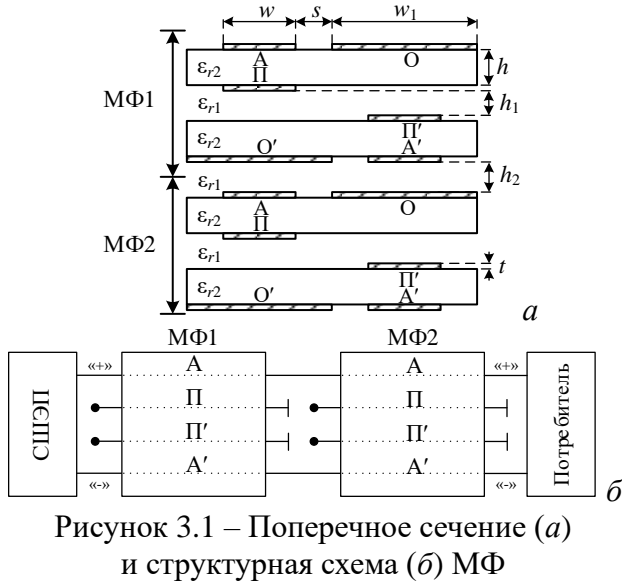
Рисунок 2.10 – Формы напряжения на выходе МФ на керамической подложке в дифференциальном (а) и синфазном (б) режимах, при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (····)

Для  $|S_{21}|$  частоты среза составили 66 МГц при эксперименте и 63 МГц при моделировании. Значения  $U_{max}$  на выходе макета МФ, составили 21 мВ в дифференциальном и 23 мВ в синфазном режимах. В результате входное импульсное воздействие длительностью 300 пс ослабляется в 11,9 и 10,8 раза.

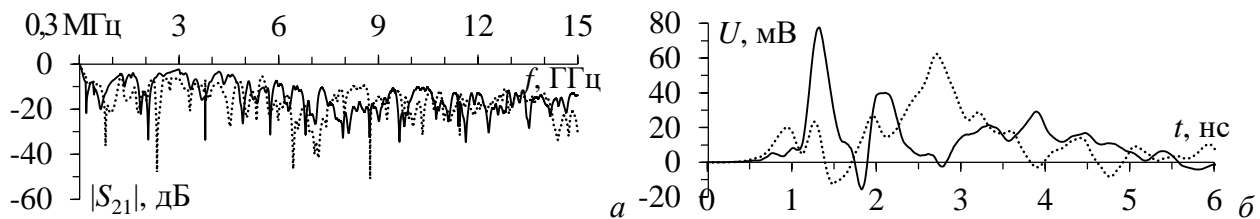
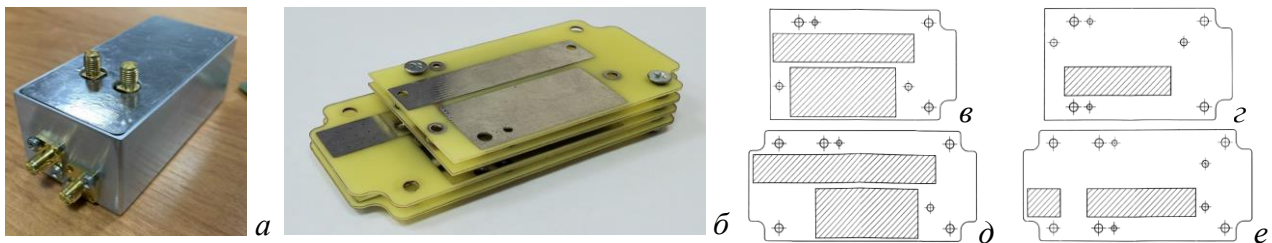
Таким образом, предложен подход для разработки устройств защиты РЭА от СКИ на основе модальных фильтров с центральной симметрией проводников, экранирующим корпусом, керамической подложкой и каскадированием, уменьшающих в дифференциальном и синфазном режимах в 7,8 – 11,9 раза амплитуду СКИ длительностью 300 пс.

### 3. Гибридный фильтр для сети электропитания космического аппарата

Здесь представлены результаты разработки гибридного фильтра для защиты цепей силовой шины электропитания (СШЭП) бортовой аппаратуры космического аппарата (КА) от синфазных и дифференциальных кондуктивных помех, состоящего из МФ и помехоподавляющего фильтра (ПФ).



МФ состоит из двух каскадов (рисунок 3.1). Длина МФ1 40 мм, а МФ2 – 45 мм. Параметры:  $w=10$  мм,  $w_1=17$  мм,  $s=2$  мм,  $t=0,105$  мм,  $h=0,33$  мм,  $h_1=2,54$  мм,  $h_2=2,54$  мм. Каждый каскад МФ состоит из двух ПП, чертежи нижнего и верхнего слоев которых показаны на рисунках 3.2в – 3.2е. На рисунках 3.2а и 3.2б показан разработанный и изготовленный МФ в экранирующем корпусе и без него. Результаты измерений МФ с экраном в частотной и временной областях представлены на рисунках 3.3а и 3.3б.



Частоты среза  $|S_{21}|$  по уровню минус 3 дБ составили 73,8 МГц в дифференциальном и 93,8 МГц в синфазном режимах, соответственно. Значения  $U_{\max}$  на выходе макета МФ составили 78 мВ в дифференциальном и 62 мВ в синфазном режимах. Таким образом, входное импульсное воздействие длительностью 300 пс ослабляется в 3,2 и 4 раза.

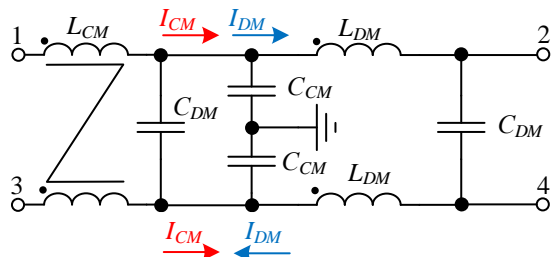
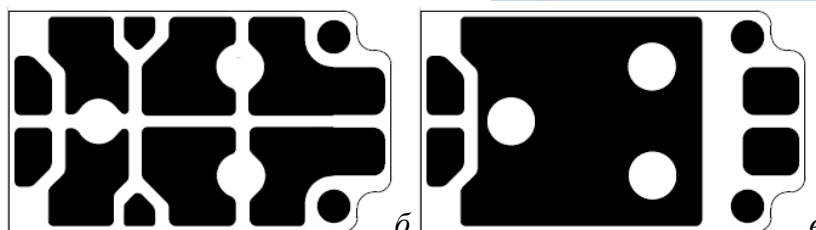


Рисунок 3.4 – Электрическая принципиальная схема ПФ

Схема ПФ на элементах с сосредоточенными параметрами показана на рисунке 3.4. На рисунке 3.5 представлены макет и фотошаблоны ПФ. Его габариты –  $70 \times 40 \times 12$  мм, вес – 31 г. Номиналы компонентов:  $L_{DM}=1100$  мкГн,  $L_{CM}=100$  мкГн,  $C_{CM}=33$  нФ,  $C_{DM}=66$  нФ.



a

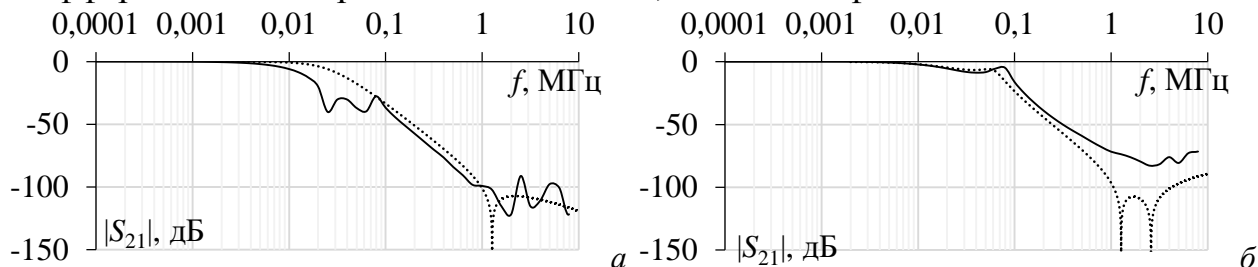


б

в

Рисунок 3.5 – Макет (a) и фотошаблоны верхнего (б) и нижнего (в) слоёв ПП ПФ

Макет ПФ располагался внутри экранирующего корпуса. На рисунке 3.6 приведены результаты электродинамического моделирования и измерений в частотном диапазоне до 10 МГц, в дифференциальном и синфазном режимах. Видно, что формы зависимостей согласуются. При эксперименте частота среза в дифференциальном режиме составила 6,8 кГц а синфазном – 14 кГц.



a

б

Рисунок 3.6 –  $|S_{21}|$  ПФ при эксперименте (—) и моделировании (···) в дифференциальном (a) и синфазном (б) режимах

Гибридный фильтр для СШЭП КА состоит из двухкаскадного МФ и ПФ. Поперечное сечение, структурная схема и макет гибридного фильтра без корпуса показаны на рисунке 3.7. Фильтр помещен в алюминиевый корпус размерами  $92 \times 45 \times 35,5$  мм.

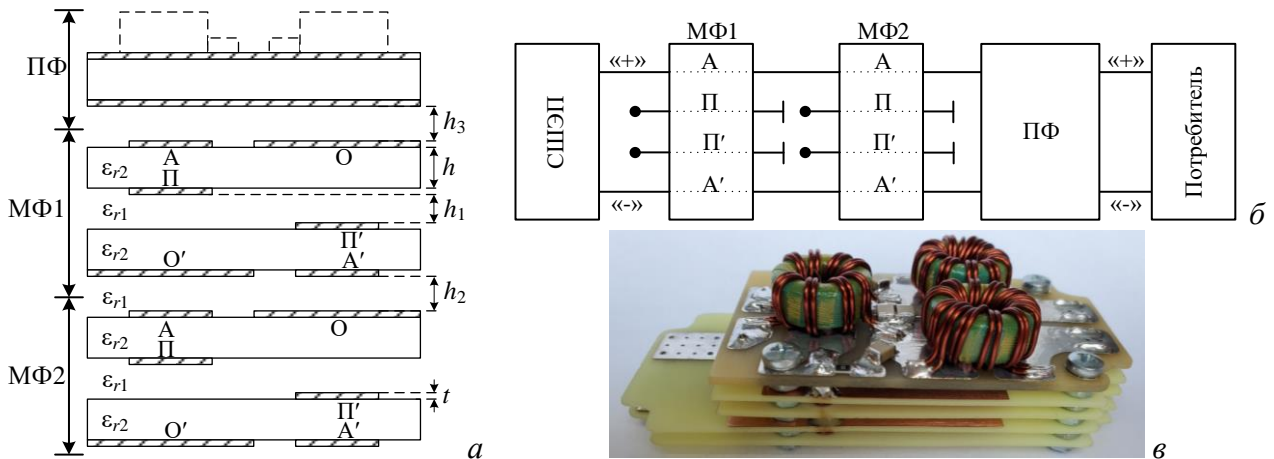


Рисунок 3.7 – Поперечное сечение (а), структурная схема (б) и макет гибридного фильтра без корпуса (в)

Результаты измерений гибридного фильтра в экране в частотной и временной областях представлены на рисунках 3.8а и 3.8б. На рисунке 3.8в он показан в корпусе без крышки, а на рисунке 3.8г – в составе прототипа СШЭП.

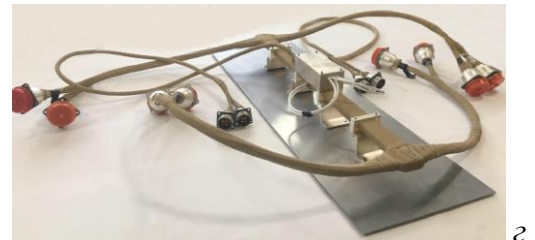
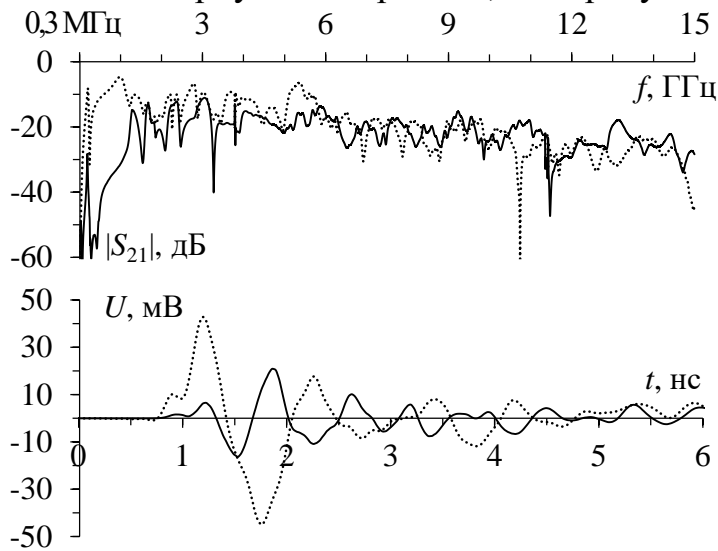


Рисунок 3.8 – Измеренные  $|S_{21}|$  (а) и формы напряжения (б) на выходе гибридного фильтра в дифференциальном (—) и синфазном (···) режимах, и его макет в экранирующем корпусе без крышки (в) и в составе прототипа СШЭП КА (г)

Значение  $U_{\max}$  на выходе гибридного фильтра составляет 21 мВ в дифференциальном и 43 мВ – в синфазном режимах. Таким образом, входное импульсное воздействие длительностью 300 пс ослабляется в 11,9 и 5,81 раза. Частота среза гибридного фильтра определяется ПФ и составляет 6,8 кГц в дифференциальном и 14 кГц – в синфазном режимах (рисунок 3.6). Макет фильтра удовлетворяет техническим характеристикам, согласованным с АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева (г. Железногорск). Он успешно прошел стендовые испытания в составе прототипа СШЭП.

Таким образом, гибридный фильтр для СШЭП КА позволяет ослабить СКИ длительностью 300 пс в 11,9 раза в дифференциальном и 5,8 раза в синфазном режимах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Результаты исследования.** Полученные модели позволяют вычислить частотные и временные отклики 2-проводной линии с асимметрией проводников и 4-проводной линии с попарной симметрией проводников в дифференциальном и синфазном режимах через конечные комбинации элементарных функций. За основу выбран МФ с лицевой связью, получены его оптимальные параметры и оконечные нагрузки (ХХ-КЗ) на концах пассивного проводника для максимального ослабления СКИ. Показано, что в экранированном 2-каскадном МФ с горизонтальным расположением каскадов коэффициент ослабления составляет 7,8 и 11,9 раза в дифференциальном и синфазном режимах, соответственно. Разработан макет МФ на керамической подложке для работы в синфазном и дифференциальном режимах. Показана согласованность результатов электродинамического моделирования и измерений. В дифференциальном режиме коэффициент ослабления равен 11,9, а в синфазном – 10,86, при частоте среза 66 МГц для обоих режимов. Разработан гибридный фильтр, состоящий из МФ для защиты СШЭП КА от СКИ и ПФ в синфазном и дифференциальном режимах. Эксперимент показал, что он ослабляет входное импульсное воздействие длительностью 300 пс в 11,9 и 5,81 раза в дифференциальном и синфазном режимах, соответственно.

**Рекомендации.** МФ могут быть использованы для защиты РЭА от кондуктивных воздействий СКИ в дифференциальном и синфазном режимах как самостоятельное устройство защиты, так и с уже имеющимися. При проектировании защитных устройств на основе МФ, каскады рекомендуется располагать друг над другом для уменьшения габаритов. Для защиты РЭА от кондуктивных СКИ по цепям питания рекомендуется использование керамических материалов. Для минимизации амплитуды импульсов на выходе МФ рекомендуется использовать структуру с оконечными нагрузками ХХ-КЗ на пассивных проводниках. Для защиты СШЭП КА рекомендуется использовать гибридный фильтр на основе МФ и ПФ. Результаты исследования могут использоваться для дальнейшей разработки устройств защиты на основе асимметричных ЛП, а также в образовательном процессе вузов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Оптимизация МФ, работающих в дифференциальном и синфазном режимах, по критериям минимизации и выравнивания амплитуд всех импульсов разложения и под современные технологии производства. Использование МФ, работающих в дифференциальном и синфазном режимах, в модальном резервировании.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Костелецкий, В.П. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 2. – С. 130–141.

2. Костелецкий, В.П. Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий,



А.М. Заболоцкий, А.М. Лакоза // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. – 2021. – № 4. – С. 127–133.

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

4. Костелецкий, В.П. Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех / В.П. Костелецкий // Доклады ТУСУР. – 2022. – № 25(1). – С. 37–47.

5. Костелецкий, В.П. Аналитические модели для вычисления частотных и временных откликов линий передачи с резистивными нагрузками и учетом асимметрии проводников / В.П. Костелецкий, Е.Б. Черникова, А.М. Заболоцкий // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 3. – С. 1–15.

#### **Статья в журнале, входящем в Q1 Scopus**

6. 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. – 2021. – Vol. 63. – No. 2. – P. 435–442.

#### **Публикации в журналах, индексируемых WoS и Scopus**

7. Kosteletskii, V. Cascade configuration of modal filters for power bus protection in differential and common modes / V. Kosteletskii // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 15. – P. 666–671.

8. Zhechev, Y.S. Electromagnetic interference filter for spacecraft power bus / Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – No. 012133. – P. 1–7.

9. Khazhibekov, R.R. Development of modal filter prototype for spacecraft busbar protection against ultrashort pulses / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky, Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 560. – No. 012145. – 2019. – P. 1–6.

10. Kosteletskii, V.P. Designing a low-mass, high-current modal filter for the spacecraft power bus / V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862. – No. 012019. – P. 1–5.

11. Zhechev, Y.S. Experimental study of a high current electromagnetic interference filter for the spacecraft power bus / Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky // Journal of Physics: Conf. Series. – 2021. – Vol. 1862. – No. 012024. – P. 1–6.

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

12. Semyonov, E.V. Comparative analysis of step and pulse signals as a test-signals for nonlinear sensing of the semiconductor objects / E.V. Semyonov, V. Kosteletskiy // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications. – Astana, Kazakhstan – June 29–30, 2017. – P. 1–4.

13. Khazhibekov, R.R. A device for an ultrashort pulse attenuation in common and differential modes in the highvoltage power supply circuits of the spacecraft / R.R. Khazhibekov, Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky // International

Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai. – June 29 – July 3, 2020. – P. 179–182.

14. Chernikova, E.B. Comparative analysis of an LC-Filter and a reflection symmetric modal filter / E.B. Chernikova, V.P. Kosteletskii // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – Erlagol, Altai. – June 29 – July 3, 2022. – P. 1–5.

15. Lakoza, A.M. Measuring radiated emission levels and EMI susceptibility of protection devices based on modal filtering / A.M. Lakoza, V.P. Kosteletskii, M.E. Komnatnov // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – Erlagol, Altai. – June 29 – July 3, 2022. – P. 1–4.

#### **Доклады в трудах отечественных конференций**

16. Костелецкий, В.П. Исследование возможности дистанционного обнаружения нелинейных элементов сверхширокополосным нелинейным сенсором / В.П. Костелецкий, Э.В. Семенов // Материалы междунаучно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017». – Томск, Россия. – 10–12 мая 2017. – С. 150–153.

17. Жечев, Е.С. Универсальный блок управления электроприводом / Е.С. Жечев, В.П. Костелецкий // 24-я международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – Томск, Россия. – 28 ноября 2018. – С. 140–143.

18. Доброславский, С.А. Помехоподавляющий фильтр на элементах с сосредоточенными параметрами для силовой шины электропитания космических аппаратов / С.А. Доброславский, Е.С. Жечев, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Материалы докладов VI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия. – 20–22 ноября, 2019. – С. 30–33.

19. Лакоза, А.М. Исследование характеристик гибридного помехоподавляющего дросселя / А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Материалы докладов VI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия. – 20–22 ноября, 2019. – С. 36–38.

20. Лакоза, А.М. Исследование характеристик помехоподавляющих фильтров с различной компоновкой индуктивных элементов / А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Материалы докладов VI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия. – 20–22 ноября, 2019. – С. 45–48.

21. Zhechev Y.S. A modal filter with a parallel oscillatory circuit in a passive conductor / Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск, Россия. – 25–27 мая, 2020. – Ч. 2. – С. 323–326.

22. Лакоза, А.М. Исследование частотных характеристик фильтра с комбинированным дросселем / А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск, Россия. – 25–27 мая, 2020. – Ч. 1. – С. 254–257.

23. Костелецкий, В.П. Разработка сильноточного модального фильтра с уменьшенной массой для силовой шины электропитания космического аппарата / В.П. Костелецкий, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Материалы докладов XVI межд. научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия. – 18–20 ноября, 2020. – С. 294–296.

24. Лакоза, А.М. Экспериментальное исследование комбинированного дросселя для фильтра подавления синфазных и дифференциальных помех / А.М. Лакоза, Е.С. Жечев, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Материалы XVI межд. научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия. – 18–20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 301–303.

25. Kosteletskii, V.P. Analysis of the influence of temperature on the modal filter attenuation coefficient in differential and common modes / V.P. Kosteletskii // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск, Россия. – 19–21 мая, 2021. – Ч. 3. – С. 175–178.

26. Лакоза, А.М. Вычисление временных откликов экранированного модального фильтра из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах на воздействие типовых сверхкоротких импульсов / А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // Материалы XVII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия. – 17–19 ноября, 2021. – С. 47–49.

27. Костелецкий, В.П. Модальное разложение пачки сверхкоротких импульсов в зеркально-симметричных структурах / В.П. Костелецкий, Е.Б. Черникова // 27-я международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. – Томск, Россия. – 16 ноября 2021. – С. 128–133.

28. Лакоза, А.М. Влияние расположения проводников модального фильтра на ослабление сверхкороткого импульса в синфазном и дифференциальном режимах / А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий // 27-я межд. научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. – Томск, Россия, 16 ноября 2021. – С. 134–139.

### Патенты

29. Патент РФ на изобретение №2748423. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий. – Заявка № 2020126543; заявлен 10.08.2020; опубликован 25.05.2021. Бюл. №15.

30. Заявка № 2021128648 РФ. Усовершенствование устройства, защищающего от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий; заявлен 01.10.2021. Решение о выдаче патента от 05.05.2022.

### Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665276. Анализ полосковой структуры, защищающей от сверхкоротких

импульсов в дифференциальном и синфазном режимах / Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М. Заявка № 2020664577. Дата поступления 20.11.2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.11.2020 г.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680555 Вычисление матрицы согласования связанных линий передач / Костелецкий В.П., Квасников А.А., Заболоцкий А.М. Заявка №2021680036. Дата поступления 08.12.2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.12.2021 г.