

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р. техн. наук, доцент

Газизов Тальгат Рашитович

Томск 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ: ОБЗОР .....	14
1.1 Актуальность защиты .....	14
1.2 Устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры от импульсных помех .....	17
1.2.1 Защита на основе элементов с сосредоточенными параметрами.....	17
1.2.2 Защита на основе элементов с распределенными параметрами.....	20
1.2.3 Защита на основе модальной фильтрации .....	24
1.3 Подходы к моделированию .....	27
1.4 Постановка цели и задач исследования .....	29
2. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ МЕЖДУ ВЫРЕЗАМИ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ .....	31
2.1 Оптимизация параметров эвристическим поиском .....	31
2.1.1 Описание исследуемой структуры.....	31
2.1.2 Влияние сегментации на результаты моделирования .....	32
2.1.3 Моделирование при произвольном наборе параметров.....	35
2.1.4 Оптимизация значения сопротивлений.....	36
2.1.5 Оптимизация по двум отдельным критериям.....	38
2.2 Влияние асимметрии поперечного сечения модального фильтра на его характеристики.....	46
2.3 Дополнительные импульсы во временном отклике .....	50
2.4 Каскадное соединение двух модальных фильтров.....	54
2.5 Патенты на изобретения.....	59
2.6 Основные результаты раздела .....	62
3. ОПТИМИЗАЦИЯ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ДВУХСТОРОННЕЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ .....	64

3.1	Оптимизация модального фильтра на двухсторонней печатной плате эвристическим поиском .....	64
3.1.1	Описание исследуемой структуры и предварительное моделирование ...	65
3.1.2	Оптимизация модального фильтра с опорными проводниками, соединенными только на концах .....	73
3.1.3	Оптимизация модального фильтра с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины.....	85
3.1.4	Влияние экрана на разложение импульса .....	88
3.1.5	Дополнительные импульсы во временном отклике модального фильтра на двухсторонней печатной плате .....	93
3.2	Анализ и оптимизация модального фильтра на двухсторонней печатной плате с лицевыми и боковыми связями .....	100
3.2.1	Описание структуры и предварительное моделирование .....	100
3.2.2	Оптимизация параметров модального фильтра .....	102
3.2.3	Влияние удаления пассивных проводников на разложение импульса ...	109
3.2.4	Дополнительные импульсы во временном отклике.....	115
3.2.5	Зеркально-симметричный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате .....	123
3.3	Заявка на изобретение .....	130
3.4	Сравнительный анализ модальных фильтров на двухсторонней печатной плате .....	133
3.5	Основные результаты раздела .....	138
4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	142
4.1	Экспериментальное исследование модального фильтра с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости .....	142
4.1.1	Моделирование для изготовления лабораторного макета .....	142
4.1.2	Макеты модальных фильтров.....	149
4.1.3	Экспериментальные исследования временных характеристик .....	151
4.1.4	Экспериментальные исследования частотных характеристик .....	158

4.1.5	Экспериментальное исследование каскадного соединения двух МФ ....	162
4.2	Экспериментальное исследование модального фильтра на двухсторонней печатной плате с опорными проводниками, соединенными только на концах.....	163
4.2.1	Оптимизация для изготовления лабораторных макетов .....	163
4.2.2	Оборудование для измерений .....	170
4.2.3	Экспериментальное исследование модального фильтра со всеми опорными проводниками.....	172
4.2.4	Экспериментальное исследование модального фильтра без верхнего опорного проводника .....	176
4.2.5	Экспериментальное подтверждение ослабления сверхкороткого импульса с помощью двух вырезов в копланарной полосковой линии .	182
4.3	Основные результаты раздела .....	183
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		186
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....		190
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		191
ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ). КОПИИ ДОКУМЕНТОВ.....		209

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 (ЭМП) 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. Киричѐк 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. Ваун, 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 (ПП). 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, меандровые линии, модальное резервирование, МФ в виде кабелей. Однако, у любого МФ есть пассивный проводник, который занимает место и имеет массу, а некоторые МФ сложны в реализации (например, на многослойных ПП). Поэтому актуально исследовать новые возможности реализации МФ без этих недостатков для повышения качества защиты. 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 радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет модальной фильтрации на двухсторонней печатной плате.

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

1. Выполнить обзор устройств защиты радиоэлектронной аппаратуры 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 двухсторонней печатной плате, 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 модальных фильтров: с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости; на двухсторонней печатной плате, для двух способов соединения опорных проводников; без верхнего опорного проводника при соединении опорных проводников только на концах; на двухсторонней печатной плате, с лицевыми и боковыми связями, в том числе при удалении нижнего пассивного проводника; зеркально-симметричного на двухсторонней печатной плате.

2. Показано влияние: асимметрии на погонные задержки мод и амплитуду импульсов разложения в модальном фильтре с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости; удаления одного и двух опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате с опорными проводниками, соединенными только на концах; экрана на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины.

3. Показана возможность разложения сверхкороткого импульса: в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате 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 модального фильтра в отдельности.

5. Приведено качественное сравнение модальных фильтров на двухсторонней печатной плате.

### **Практическая значимость**

1. Разработаны макеты модальных фильтров на двухсторонней печатной плате для экспериментальных исследований модального разложения сверхкороткого импульса.

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

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

4. Внедрены результаты квазистатического моделирования модальных фильтров с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости и на двухсторонней печатной плате 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.

Результаты проведенных исследований соответствуют паспорту специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения согласно области «Разработка научных и технических основ

проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств».

### **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 РФФИ 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, гранта Президента РФ; РФФ; 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:

1. Международная научно-техническая конференция «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2016, 2017, 2019, 2021 г.

2. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2016, 2018, 2020, 2021 г.
3. Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2018, 2019 г.
4. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2020 г.
5. Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)», 2021 г.
6. International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON-2019), г. Томск, 2019 г.
7. International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Алтай, 2020 г.

**Публикации.** Результаты опубликованы в 32 работах (12 без соавторов).

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	4
Статья в журнале, индексируемом Scopus (Q1)	1
Статья в журнале, индексируемом Scopus (Q2)	1
Статья в журнале, индексируемом в WoS и Scopus	6
Доклад в трудах конференции, индексируемой в WoS и Scopus	2
Доклад в трудах отечественной конференции	13
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	2
Патент на изобретение	3
<b>ИТОГО:</b>	<b>32</b>

**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 объем диссертации.** В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список источников из 137 наименований, приложение из 10 с. Объем диссертации с приложением – 218 с., в т.ч. 136 рис. и 70 табл.

**Краткое содержание работы.** Во введении представлена краткая характеристика работы. В разделе 1 выполнен обзор исследований по защите РЭА

от СКИ, а также сформулированы цель и задачи работы. В разделе 2 приведены результаты оптимизации и анализа МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости. В разделе 3 приведены результаты анализа и оптимизации МФ на ДПП. В разделе 4 представлены результаты реализации, моделирования и измерения макетов МФ. В приложении А приведены копии актов внедрения, свидетельств, патентов, а также дипломов.

# 1. ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ: ОБЗОР

## 1.1 Актуальность защиты

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) развивается в сторону создания все более сложных технических средств и миниатюризации не только электронных компонентов, но и изделий, где эти компоненты применяются. Как следствие, возрастают плотность компоновки и взаимное влияние компонентов, в результате чего неизбежно возникновение помех, от которых необходимо защитить аппаратуру [1–3].

С другой стороны совершенствуются источники радиочастотного излучения: случайного [4–6] и преднамеренного воздействий (электромагнитный терроризм) [7–20]. В [21] приведены существующие в мире технологии широкополосных импульсных источников, а также лабораторные и испытательные установки. В работе [22] рассмотрены особенности сверхширокополосных (СШП) радаров, излучающих сигналы, пространственная длительность которых значительно меньше размеров антенны и/или продольного размера облучаемой цели. Показано, что в процессе радиолокации цели, такой сигнал неоднократно изменяет свою форму, а в приемник радара приходит как неизвестный сигнал. В работе [23] представлен анализ имеющихся за рубежом теоретических и экспериментальных результатов, связанных с разработкой и использованием генераторов преднамеренных электромагнитных помех, методов и средств защиты от их деструктивного воздействия элементов электронной инфраструктуры объектов. В работе [24] экспериментально показано влияние мощного преднамеренного СВЧ излучения на военную технику, автомобили, компьютеры и систему безопасности. Показано, что расстояние для генерации преднамеренного СВЧ излучения может достигать километра.

Особенно остро вопрос влияния помех стоит для «ответственных» устройств военной и гражданской техники (например, медицинского

оборудования), работающих в реальном масштабе времени, для которых недопустимы даже кратковременные сбои, так как они могут привести к потере информации, ошибкам при выполнении вычислительных алгоритмов, потере управления и т.д. [25–36].

В последние годы появились новые стационарные и подвижные генераторы, излучающие периодические и однократные СШП электромагнитные импульсы (ЭМИ). Во временной области сверхширокополосный сигнал представляется в виде сверхкороткого импульса (СКИ) малой длительности. Сбои, возникающие при импульсных помехах в электронных устройствах, могут вызвать повреждение, рассеивание мощности и разрушение устройств. Эффекты повреждения обычно возникают, когда импульсная помеха попадает в оборудование по линиям питания или передачи данных. После этого электронные компоненты пытаются обработать импульсную помеху как действительную логическую команду. В результате происходит блокирование системы, возникают сбои, выдаются ошибочные данные на выходе, теряются или повреждаются файлы, а также возникают другие нежелательные эффекты. Материалы, используемые для изготовления электронных компонентов, могут выдерживать определенное число повторяющихся энергетических всплесков в течение небольшого времени. Происходящий замедленный распад электронных компонентов в конечном итоге приводит к выходу их из строя. Эффекты разрушения обобщают все случаи, когда импульсные помехи с высокими уровнями энергии вызывают немедленный отказ оборудования. Часто это видимые физические повреждения, например, сгоревшие или треснувшие платы и компоненты персонального компьютера, оплавленные электронные компоненты и др. Кроме того, электронные компоненты и цепи, такие как микропроцессоры, составляющие сегодня основную часть используемых элементов, работают на все более высоких частотах и низких напряжениях и, таким образом, становятся все более восприимчивы к СШП ЭМИ [37–46].

Особое внимание уделяется стандартам и регламентам по ЭМС. Несоблюдение регламентов по ЭМС возможно лишь в том случае, если это макет

или опытный образец, изделие специального назначения, одиночная продукция, не предназначенная для продажи, и решения, разработанные не для рынка, а поставляемые по отдельным контрактам с оговоренными условиями и рисками заказчика [47]. В России существует ряд нормативных документов в области помехоустойчивости и информационной безопасности технических средств: ГОСТ 29073-91 (Совместимость технических средств измерения, контроля и управления промышленными процессами, электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам), ГОСТ 51317.4.4-200 (МЭК 61000-4-4-2004. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и метод испытаний), ГОСТ 51317.4.5-200 (МЭК 61000-4-5-95. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний), ГОСТ Р 50922-2006 (Защита информации. Термины и определения), ГОСТ Р 51275-2007 (Защита информации. Объекты информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения) и др .

Важность этой темы подчеркивает, например, и тот факт, что в 2021 г. проводилось 3 представительных конференции по вопросам ЭМС: АРЕС-2021; Международная выставка EMV Stuttgart-2021 и Симпозиум по EMC+SIP1. Только весной 2021 г. в России состоялись две практические конференции, посвященные проблемам ЭМС, с широким кругом участников. Это «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости – ТехноЭМС-2021», которая прошла в Москве в марте, и X Всероссийская научно-техническая конференция «Электромагнитная совместимость–2021», проведенная в мае [47].

О важности обеспечения ЭМС при проектировании, конструировании и моделировании РЭА говорят принятие современных регламентов и стандартов, большое количество научных трудов и публикаций, проведение конференций и симпозиумов. Одной из задач ЭМС является защита РЭА от СШП помех, в частности от СКИ, высокая энергия которого может привести к немедленному отказу оборудования.

## **1.2 Устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры от импульсных помех**

### **1.2.1 Защита на основе элементов с сосредоточенными параметрами**

Задача защиты – предотвращать или сводить к минимуму ущерб, вызванный скачком напряжения, при этом сама система защиты или защитный элемент должны срабатывать безопасным способом. Современные цифровые и аналоговые микросхемы сами по себе, как правило, имеют специальные защитные цепи, обеспечивающие проводящие пути для устранения помех. Как правило, известные устройства и способы защиты либо поглощают энергию, либо отводят ее в цепь защитного заземления, либо используется комбинация подходов, тем самым обеспечивая более высокий уровень стойкости РЭА. Процесс шунтирования импульса помехи на заземление реализуют при помощи различного рода нелинейных компонентов, основным принципом работы которых является уменьшение омического сопротивления при превышении приложенного напряжения выше уровня срабатывания (газоразрядники, варисторы, TVS-диоды).

Газовые разрядники служат для защиты от самых мощных помех, они применяются в качестве первичной защиты телекоммуникационных и силовых цепей. Значение пиковых токов у них достигает тысячи ампер, при этом число срабатываний оказывается достаточно большим. Среди недостатков можно отметить высокое напряжение включения, значительные габариты и низкое быстродействие. Продолжительное срабатывание (более 0,15 мкс) не решает проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем [48, 49].

Варисторы, благодаря высокому соотношению пиковых токов и габаритов, оптимальны для создания максимально компактных решений при защите от мощных помех. Обладая широким диапазоном рабочих токов и напряжений, они успешно служат для защиты электронных компонентов на печатной плате. К недостаткам варисторов относятся ограниченный срок службы и большая

собственная емкость (тысячи пикофарад), не допускающая их включение в высокоскоростные линии передачи данных, а также проблема SMD монтажа [49 – 50].

TVS-диоды, имеющие наименьшее значение напряжений и самое быстрое время срабатывания среди всех перечисленных компонентов, могут применяться в низкоомных цепях. Они хорошо подходят для защиты полупроводниковых приборов или организации оконечной ступени в комбинированных защитных устройствах. Их достоинства – высокая долговечность и широкий диапазон рабочих напряжений. Низкая собственная емкость не влияет на сигнальные и логические линии, позволяя устанавливать их в различных коммуникационных интерфейсах. Однако и они имеют некоторые недостатки, такие как низкое значение номинального импульсного тока и высокая стоимость [50]. Кроме того они имеют низкую радиационную стойкость из-за наличия полупроводниковых элементов.

Кроме того, для повышения защищенности РЭА от кондуктивных помех предлагаются такие устройства защиты, как ограничители, фильтры и т.д. Рассмотрим некоторые из них.

Известно устройство для защиты РЭА от импульсных перенапряжений [51]. Оно состоит из разрядников и дополнительных компонентов и позволяет улучшенную защиту от разнополярного импульса. Известно устройство для защиты средств связи от импульсных перенапряжений [52]. В устройство введен блок запуска, включенный между шунтирующим блоком и антенно-фидерным трактом. Известно устройство защиты приемного тракта радиолокационных станций от мощного электромагнитного излучения [53]. Оно состоит из датчика, линии задержки и двух разрядников (итерационного и быстродействующего). Недостатками устройств является сложность конструкции и малый ресурс.

Известно устройство защиты потребителей от превышения напряжения по сети электропитания [54]. Устройство обладает повышенной устойчивостью к воздействию высокочастотных единичных импульсов в сети питания и обеспечивает обесточивание потребителя при превышении напряжения в сети

выше уровня настройки. Недостатком устройства является не всегда приемлемое обесточивание устройства и довольно сложная схемотехника.

Известно устройство защиты входа радиоприемника от электромагнитного импульса ядерного взрыва [55]. Устройство содержит штыревую антенну, соединенную кабельной линией с приемником, трехсекционный автотрансформатор, две емкости и запирающую катушку. Известно устройство защиты электроприемников от воздействия разрядов молнии и электромагнитных импульсов, наводимых от разрядов в магистральных кабельных линиях электропередачи [56]. Устройство состоит из ряда электромеханических компонентов. Недостатком устройств является сложность схемы.

Известно устройство защиты «Электрическая розетка с защитой от помех» [57]. Решение достигается тем, что в исходную электрическую розетку введен высокочастотный сетевой фильтр и дополнительная клемма земли. Данные элементы установлены во внутренней полости основания. Реализованы специальные подвижные узлы, которые установлены на основании и позволяют коммутировать контакты для электрического соединения фазы и нуля элементов защиты с проводами первичной электрической сети только при установке штырей вилки кабеля электропитания вычислительной техники в отверстиях. Недостатком устройства является сложность конструкции.

Также для защиты применяются помехозащитные фильтры нижних частот (ЕМИ-фильтры). Так, в работе [58] приведен обзор активных ЕМИ-фильтров для снижения уровня кондуктивных электромагнитных помех в силовых электронных преобразователях. Однако общими недостатками для фильтров можно считать следующие:

- фильтры имеют высокую стоимость, особенно силовые фильтры, рассчитанные на большие токи;
- для большого количества цепей, требующих защиты, при стандартном подходе понадобится и большое количество фильтров, которые занимают большой объем, далеко не всегда имеющийся в наличии;

- фильтры включаются в разрез контрольных и силовых кабелей, что при наличии большого количества цепей существенно затрудняет установку фильтров и делает эту работу дорогой и сложной [59].

### 1.2.2 Защита на основе элементов с распределенными параметрами

В последнее время все чаще используются в качестве защитных устройств микрополосковые линии (МПЛ) и копланарные полосковые линии (КПЛ) [60, 61]. Их поперечные сечения показаны на рисунке 1.1. Результаты исследований их волнового сопротивления, структуры электромагнитного поля, потерь в проводниках и диэлектриках приведены в работе [62].

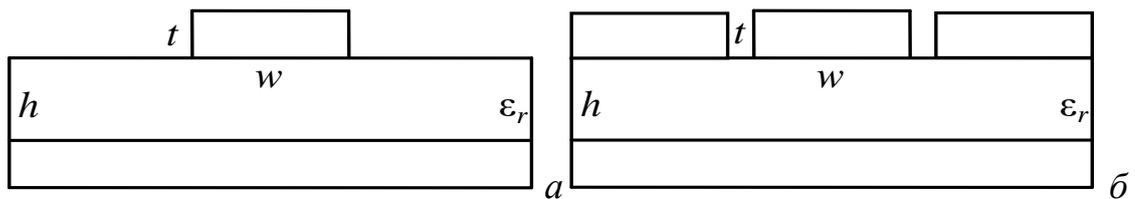


Рисунок 1.1 – Поперечные сечения МПЛ (а) и КПЛ (б)

Известны связанные микрополосковая (на одной стороне подложки) и копланарно-желобковая (на обратной стороне подложки) линии [63]. Поперечное сечение линии показано на рисунке 1.2. Для неё получены аналитические выражения для вычисления погонных емкостей и индуктивностей, выявлена приемлемая для практики погрешность анализа.

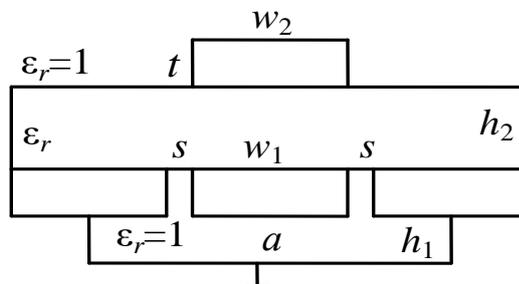


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение связанных микрополосковой и копланарно-желобковой линий [63]

МПЛ и КПЛ можно реализовать на обычной ДПП. Актуальность использования ДПП связана с тем, что она гораздо дешевле многослойной ПП. По сравнению с однослойными ПП, они имеют больше места для компонентов, поскольку обе стороны ПП проводящие. Использование двух сторон вместо одной позволяет уменьшить общий размер платы, что может иметь важное значение при разработке легких интегрированных систем. Наличие меди с обеих сторон позволяет ДПП быть более гибкой. Расположение элементов печатного монтажа на металлическом основании позволяет решить проблему теплоотвода в высокоточной и радиопередающей аппаратуре. Так, ДПП нашли свое применение в системах управления движением, автомобильных приборных панелях, реле управления и преобразователях мощности, регуляторах и блоках питания, тестировании и контроле различного оборудования, принтерах и системах сотовой связи [64]. В свою очередь, устройства защиты на основе МПЛ и КПЛ имеют малые габариты, высокую добротность, температурную стабильность, простоту конструкции, надежность, малую стоимость, возможность автоматизированного производства, практически неограниченный срок службы, функционирование в широком диапазоне напряжений.

В работе [65] рассмотрены встречно-штыревые микрополосковые фильтры как устройства защиты от СШП импульсов. Выявлено, что такие фильтры подходят для защиты электронных цепей от очень быстрых переходных процессов опасной амплитуды и легко интегрируются в электронные схемы. В работе [66] описаны варианты построения микрополосковых фильтров на шпилечных резонаторах, короткозамкнутых с одного конца, с полюсами затухания вблизи полосы пропускания. На рисунке 1.3 приведен восьмirezонаторный фильтр с дополнительными связями на поликоре. Полоса пропускания по уровню минус 3 дБ составляет от 0,96 до 1,23 ГГц, потери в полосе пропускания достигают 1,5 дБ, полосы заграждения по уровню минус 70 дБ расположены ниже 0,88 ГГц и выше 1,33 ГГц.

В работе [67] приводится описание одной из разновидностей микрополосковых фильтров. Выполнено её показательное сравнение по эксплуатационным параметрам с другими типами микрополосковых фильтров.

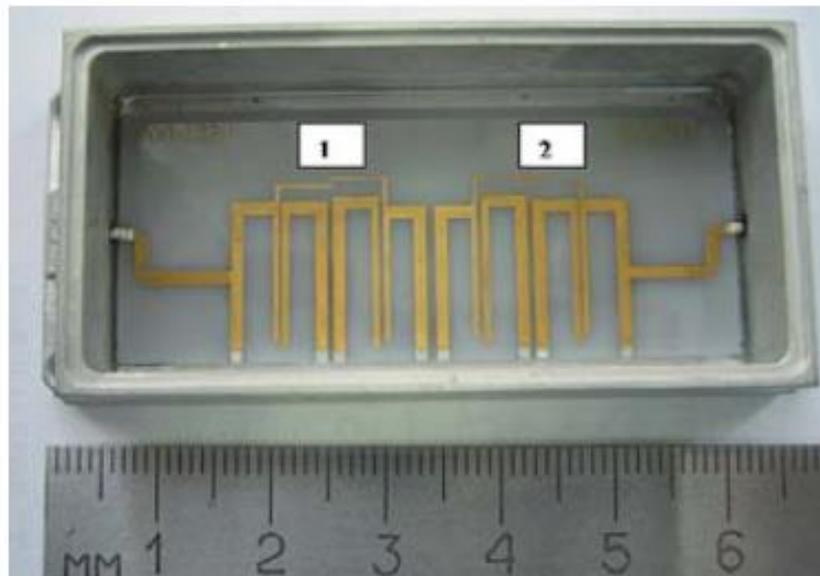


Рисунок 1.3 – Связанные микрополосковые линии с апертурой в плоскости заземления [66]

В работе [68] приведен анализ многопроводных связанных микрополосковых линий с апертурой в плоскости земли для проектирования широкополосного фильтра. За основу создания фильтра взята обычная связанная микрополосковая линия, в плоскости земли которой сделан вырез. Поперечное сечение исследуемой структуры приведено на рисунке 1.4а. Результаты вычисления и моделирования показали, что вырез в плоскости земли позволил увеличить полосу пропускания до 5 ГГц, тогда как без апертуры – 2,2 ГГц. На основе полученных результатов разработан макет такого фильтра, фото которого приведено рисунке 1.4б.

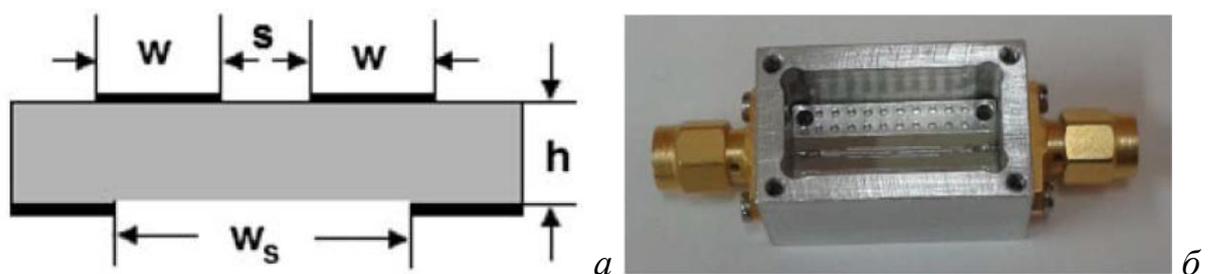


Рисунок 1.4 – Связанные микрополосковые линии с апертурой в плоскости заземления (а) и фото фильтра на его основе (б) [68]

В работе [69] предложен новый компактный полосно-заграждающий микрополосковый фильтр, основанный на заземленном patch-резонаторе, встроенного в микрополосковую линию (рисунок 1.5).

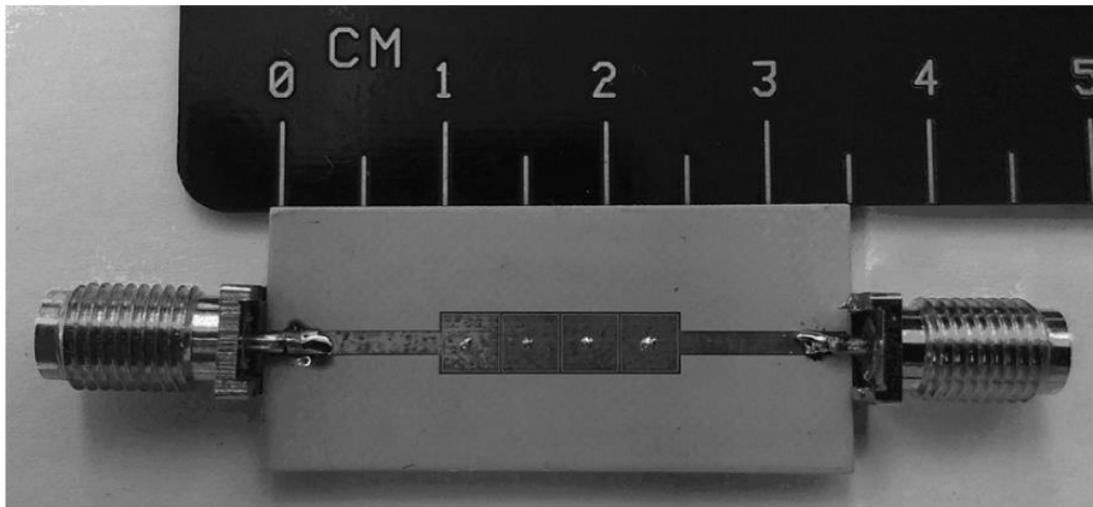


Рисунок 1.5 – Фотография изготовленного полосового фильтра [69]

В работе [70] представлен новый метод проектирования эллиптического полосно-пропускающего СВЧ-фильтра с реализацией на системе связанных микрополосковых линий одинаковой электрической длины. Макет фильтра показан на рисунке 1.6. Реализация такого фильтра представляет интерес с точки зрения миниатюризации сложных СВЧ-устройств и особенно актуальна для мобильных и бортовых средств радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

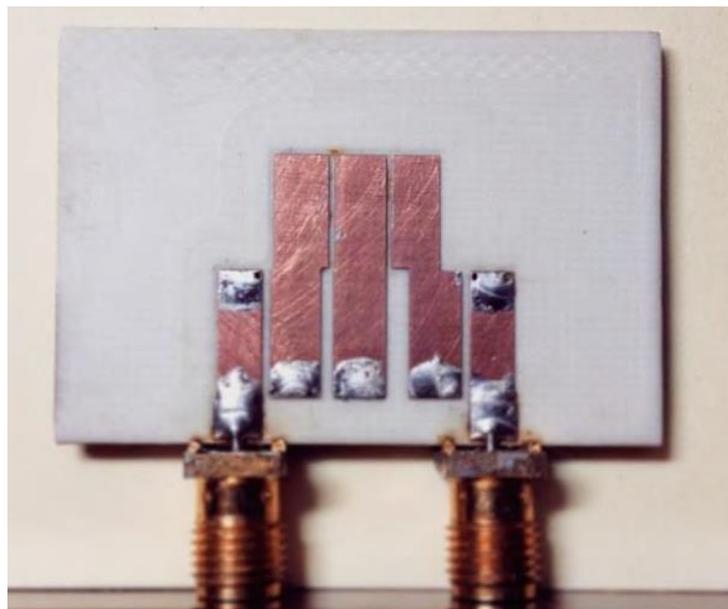


Рисунок 1.6 – Образец микрополоскового ступенчатого СВЧ-фильтра [70]

В работе [71] рассмотрены новые конструкции планарных трехрезонаторных полосно-пропускающих фильтров с перекрестной связью, обладающих большим многообразием частотных характеристик. Показано, что фильтры имеют малые размеры, соизмеримые с габаритами микроволновых керамических фильтров. Так, на частоте 1,9 ГГц размер трехрезонаторного фильтра полосковой конструкции составил  $9,4 \times 5 \times 2$  мм при диэлектрической проницаемости материала  $\epsilon_r=92$ , а шестирезонаторного фильтра –  $10 \times 9,4 \times 2$  мм.

### 1.2.3 Защита на основе модальной фильтрации

По другому работают новые защитные устройства, называемые модальными фильтрами (МФ) [72]. Основная идея модальной фильтрации заключается в изменении формы помехового импульса сигнала за счет разности задержек мод его поперечных волн в многопроводной линии передачи. При распространении импульса в отрезке линии с неоднородным диэлектрическим заполнением, состоящей из  $N$  проводников (не считая опорного), он может подвергаться модальным искажениям, вплоть до разложения на  $N$  импульсов меньшей амплитуды из-за различия погонных задержек мод в линии [73, 74]. Для полного разложения импульса необходимо выполнение условия

$$t_{\Sigma} < l \min |\tau_i - \tau_k|, \quad i, k=1, \dots, N, \quad i \neq k, \quad (1.1)$$

где  $t_{\Sigma}$  – общая длительность импульса по уровню 0,  $l$  – длина отрезка линии,  $\tau_i$  – погонная задержка  $i$ -й моды отрезка.

Исследование технологии МФ ведется по четырем основным направлениям:

1. МФ в печатных платах. Исследованы и изготовлены МФ с разными конструктивными особенностями, например, зеркально-симметричный МФ. Так, в работе [75] выполнено экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ в зеркально-симметричном МФ. В таком МФ достигнуто ослабление в 3,77 раза (по результатам эксперимента) при контролируемой полосе пропускания полезного сигнала 250 МГц. Исследован МФ с периодическим профилем области связи проводников. В работе [76] показано, что такой МФ

ослабляет СКИ в 2,5 раза при сопротивлениях 100 Ом на концах пассивного проводника и в 2,85 раза – при КЗ-ХХ. Исследован простой асимметричный МФ [77]. В работе [78] показана возможность ослабления в 5,5 раза в асимметричном МФ без резисторов. Также для совершенствования защиты от СКИ может применяться каскадное соединение [76, 79] отрезков связанных линий.

2. МФ в виде кабелей. Исследованы существующие трехпроводные силовые кабели плоского и круглого сечений [80]. В работе [81] представлены результаты моделирования и оптимизации многопроводных МФ с круглым поперечным сечением: рассмотрены 4 структуры из 2–5 проводников. Исследовано распространение импульсов в отрезках гибкого печатного кабеля (ГПК) разной длины и показано уменьшение амплитуды воздействующего импульса длительностью 0,3 нс в 2 раза в отрезке ГПК длиной 1 м, что демонстрирует возможность защиты РЭА от мощного СКИ за счет его разложения на последовательность импульсов, причем это осуществимо из-за специфики самой структуры ГПК [82].

3. Модальное разложение СКИ с использованием меандровых линий. Например, в работе [83] исследовано разложение СКИ в витке меандровой МПЛ.

4. Модальное резервирование (МР). Первые результаты его систематизированы в работе [84]. Основная идея МР заключается в трассировке резервируемых и резервных проводников на ПП таким образом, чтобы между ними образовывалась сильная электромагнитная связь. Вследствие этого, появляется возможность использования модальных искажений для защиты от СКИ. Так, в работе [85] впервые экспериментально показано разложение СКИ в резервных цепях.

Выявлено, что в структурах с модальным разложением присутствуют дополнительные импульсы, кроме импульсов мод. Так, в работе [86] при исследовании безрезистивного исполнения структуры, в случае КЗ в начале пассивного проводника и ХХ в конце, обнаружены импульсы с задержками, некратными задержкам отраженных импульсов четной и нечетной мод. Также отмечены особенности форм импульсов, которые отличаются от трапецевидных,

и доказано, что эти импульсы возникают из-за наложения основных и дополнительных импульсов. Для доказательства данного утверждения выполнено квазистатическое моделирование при воздействии э.д.с. 5 В с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. Это позволило разделить наложенные импульсы и выявить закономерность их появления. Показано, что они описываются линейными комбинациями задержек четных и нечетных мод линии. Наличие дополнительных импульсов показано в работе [87], где рассматривается гибридное устройство защиты на основе каскадного соединения МФ и МЛ с лицевой связью. В работе [88] при моделировании временного отклика в 3 исследуемых схемах зеркально-симметричных меандровых линий обнаружены дополнительные импульсы в выходном сигнале. В зависимости от соединения проводников дополнительные импульсы имеют значения задержек, которые равны среднему арифметическому двух задержек импульсов как основных, так и дополнительных. В работе [89] предложена методика выявления дополнительных импульсов во временном отклике структур с модальным разложением. Важность исследования дополнительных импульсов заключается в том, что они позволяют отделить часть энергии от основной последовательности импульсов мод. За счет этого можно дополнительно распределить энергию по времени, а также, в некоторых случаях, достичь минимизации максимальной из амплитуд импульсов мод.

Устройства на основе МФ уже нашли своё применение в аппаратуре сети Ethernet МЧС г. Томска [90]. Во время эксплуатации произошло около трех скачков напряжения сети энергоснабжения. В результате одного из них выведен из строя коммутатор локальной сети, вышли из строя сетевые адаптеры на двух персональных компьютеров, а оборудование, защищенное МФ, не пострадало [91].

### 1.3 Подходы к моделированию

На этапе постановки задачи с учетом имеющихся данных и требований к точности моделирования необходимо определить, какой подход будет использован: схемотехнический, квазистатический или электродинамический. В их рамках применяются эвристические, аналитические, численные и комбинированные методы [92]. Схемотехнический подход основан на законах Кирхгофа, а моделирование с его помощью выполняется с использованием принципиальных электрических схем. Электродинамический подход, основанный на решении уравнений Максвелла, является универсальным и позволяет решать задачи с произвольной геометрией. Однако при использовании этого подхода требования к вычислительным ресурсам могут оказаться чрезвычайно высокими. Промежуточное положение занимает квазистатический подход, основанный на том, что поперечные размеры рассматриваемой системы много меньше длин волн распространяющихся в ней сигналов. Это позволяет рассматривать наличие только основной Т-волны (ТЕМ-волны), не рассматривая волны высшего типа. Распределения полей вычисляются из решения электро- и магнитостатических задач, требующих решения уравнений Пуассона и Лапласа. Этот подход получил широкое распространение при моделировании линий передачи с помощью телеграфных и производных от них уравнений [93].

Данный подход реализован в ПО TALGAT [94, 95]. Система TALGAT базируется на математических моделях на основе метода моментов, где практически все вычисления сведены к матричным операциям. Одной из особенностей системы TALGAT является возможность задания различных структур для возможности проведения разного рода исследований. Так, например, можно моделировать коаксиальные, микрополосковые, полосковые, копланарные и др. линии передачи.

При квазистатическом подходе электрические характеристики, меняющиеся вдоль отрезков многопроводной линии передачи (МПЛП) длиной  $dx$ , описываются матрицами погонных первичных параметров  $\mathbf{R}$  (Ом/м),  $\mathbf{L}$  (Гн/м),  $\mathbf{C}$  (Ф/м) и

$\mathbf{G}$  (См/м). Вычисленные матрицы затем используются при решении телеграфных уравнений Хевисайда или производных от них для анализа целостности сигналов, получения временного отклика и других параметров.

Расчет емкостных матриц осуществляется на основе решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Аналитические выражения для элементов матрицы СЛАУ и порядок их вычисления описаны в [96]. В работе [97] приведен обзор задач имитационного моделирования в ЭМС. Описаны прямые и итерационные методы решения СЛАУ, а также форматы хранения разреженных матриц. Предложены алгоритмы итерационных методов с предобуславливанием, использующие разреженные форматы хранения матриц, и алгоритмы многократного решения СЛАУ. Представлены результаты экспериментов на примере решения задач вычисления емкостной матрицы различных полосковых структур.

Теоретические основы и алгоритмы расчета квазистатических откликов вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП, включенного в произвольную схему, описано в работе [98]. Этот алгоритм применим и для расчета более простых структур. В работе [99] изложены методы и приведены алгоритмы вычисления временного отклика произвольных схем МПЛП. Представлены результаты моделирования временного отклика на импульсные сигналы для реальных структур ПП и кабелей.

В работе [100] приведено сравнение результатов моделирования разными методами (функций Грина, моментов и вариационным). Показано, что результаты метода моментов, реализованного в системе TALGAT, хорошо согласуются с другими. Для двух связанных полосок на подложке приведено сравнение значений матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ , полученных в системе TALGAT и приведенных в работе [101]. Рассмотрены случаи, когда боковые диэлектрические стенки подложки становятся ближе к торцам полосок, и аналогичные случаи без боковых диэлектрических стенок. Максимальные ошибки составляют 1,4% для диагональных и 8,1% для внедиагональных значений. Затем рассмотрены 3 одинаковые полоски, различного расположенные на двух различных диэлектрических слоях [102]. Сравнение

результатов, полученных в TALGAT и методом интегральных уравнений, показало максимальную ошибку 8,8% для **C** и 0,8% для **L**.

Существуют показательные и общедоступные примеры сравнения результатов системы TALGAT с результатами измерений и электродинамического анализа, которые здесь не приводятся [103, 104].

#### **1.4 Постановка цели и задач исследования**

В данном разделе отмечена актуальность обеспечения ЭМС РЭА. Она вызвана микроминиатюризацией, ростом функциональных возможностей технических средств различного назначения, расширением используемого диапазона частот, совершенствованием средств преднамеренного электромагнитного воздействия, ужесточением требований к стойкости РЭА к воздействию различных электромагнитных излучений, в том числе СКИ высокой мощности. Обычные защитные устройства (фильтры, устройства развязки, ограничители помех, разрядные устройства и др.) не способны эффективно защитить от СКИ. Они имеют крупные габариты, высокую стоимость, а также низкую радиационную стойкость из-за наличия полупроводниковых элементов. Поэтому актуален поиск новых устройств защиты.

Новым, малогабаритным и дешевым в реализации, средством защиты от СКИ являются МФ, в которых происходит разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды вследствие различия погонных задержек мод сигнала в связанной линии с неоднородным диэлектрическим заполнением. Однако все МФ требуют наличия пассивного проводника, что ухудшает их массогабаритные характеристики. Некоторые из них сложны в изготовлении. Например, зеркально-симметричный МФ представляет собой 3-слойную печатную плату, реализация которой затруднительна. К недостатком его можно отнести и длину линии (1 м). Кроме того, реализация МФ с периодическим профилем усложняет ПП. Поэтому актуален поиск новых конструкций МФ, свободных от этих недостатков. Так, предлагается исследовать МФ на ДПП. Кроме того, ДПП применяются для

широкого круга современных изделий как специального назначения, так и в бытовой технике. Столь широкое распространение объясняется меньшими трудозатратами при проектировании и разводке ПП и более простой, по сравнению с многослойными ПП, технологией изготовления. Использование полигонов схемной земли в МФ позволит их реализовывать не только как отдельные защитные устройства, но интегрировать в 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.

## 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ МЕЖДУ ВЫРЕЗАМИ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ

Здесь представлены результаты исследования нового МФ: особенностей его конфигурации, заключающегося в реализации пассивного проводника между вырезами в опорной плоскости [105, 106], влияния сегментации его поперечного сечения на результаты моделирования [107]; улучшения его характеристик за счет выбора сопротивлений на концах пассивного проводника [108]; улучшения его характеристик посредством оптимизации по двум критериям отдельно [109–111]; анализа влияния асимметрии его поперечного сечения на погонные задержки мод и амплитуду импульсов [112, 113]; анализа появления дополнительных импульсов при асимметрии в поперечном сечении и изменении граничных условий на концах пассивного проводника [114, 115]; анализа влияния каскадного соединения двух МФ одинаковой длины при согласованном случае [116] и изменении граничных условий [117].

### 2.1 Оптимизация параметров эвристическим поиском

#### 2.1.1 Описание исследуемой структуры

Конструкция МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости образуется за счет двух вырезов в плоскости земли обычной МПЛ, которые образуют между собой пассивный проводник. Переход от МПЛ к МФ показан на рисунке 2.1.

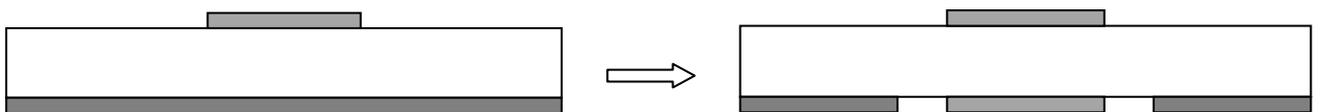


Рисунок 2.1 – Переход от МПЛ к МФ

Поперечное сечение и эквивалентная схема исследуемого МФ приведены на рисунке 2.2. Параметры поперечного сечения:  $s_1$  и  $s_2$  – расстояние между

проводниками,  $w_1$  – ширина активного проводника,  $w_2$  – ширина пассивного проводника,  $w_3$  – ширина опорных проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $t$  – толщина проводников.

Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . На другом конце активный проводник соединен с нагрузкой  $R3$ . Принято  $R1=R2=R3=R4=50$  Ом. Левый опорный проводник соединен с правым лишь на концах и обозначается как отдельный проводник, закороченный на землю. Следовательно, в такой линии распространяются 3 моды с соответствующими им характеристиками.

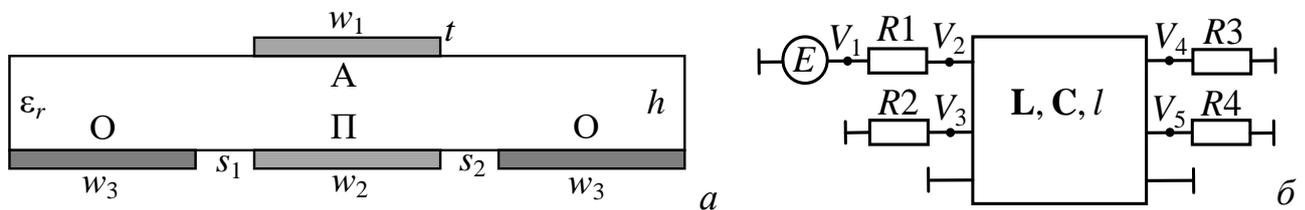


Рисунок 2.2 – Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б)

МФ с пассивным проводком между двумя вырезами в опорной плоскости.

Проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный

### 2.1.2 Влияние сегментации на результаты моделирования

Редкая сегментация поперечного сечения и асимметрия матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$  приводят к некорректным результатам. Поэтому выполнено предварительное моделирование при учащении сегментации. Она бралась равномерной на всех границах, но контролировалась по количеству сегментов ( $n$ ) на торцах проводников, от 1 до 7 сегментов. Оценивалось ее влияние на асимметрию матриц и задержки мод. Отсутствие резких изменений результатов указывало на их сходимость. Влияние сегментации на результаты моделирования оценивалась при  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм,  $s=3,5$  мм,  $h=180$  мкм,  $t=35$  мкм и  $l=30$  см.

Элементы исходных матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$  приведены в таблице 2.1, а симметрированных (по среднему арифметическому) – в таблице 2.2.

Максимальные значения элементов матриц асимметрии сведены в таблицу 2.3.

Они рассчитывались как

$$(|X_A - X_C|/|X_C|) \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где  $X_A$  – элемент асимметричной матрицы, а  $X_C$  – симметричной.

Анализ таблицы 2.1 не показывает нефизичных результатов (внедиагональные элементы матрицы  $C$  отрицательны даже при самой редкой сегментации). Однако таблица 2.3 показывает довольно большую асимметрию матрицы  $C$  (более 40%) при  $n=1$ . Это означает, что данные результаты могут быть некорректными. Действительно, сложение элементов матрицы  $C$  по любой строке не должны быть отрицательным. Однако для строк 1 и 2 это условие не выполняется. Между тем в симметризованной матрице это условие уже выполняется, причем даже при  $n=1$ . При увеличении сегментации асимметрия уменьшается до 2% при  $n=3$ , так что теперь результаты применимы для дальнейших расчетов.

Таблица 2.1 – Исходные матрицы

$n$	Матрицы					
	L, нГ/м			C, пФ/м		
1	1062,37	1032,96	842,981	810,909	-803,958	-8,09548
	1032,96	1062,07	842,981	-803,99	810,868	-8,19332
	844,739	844,739	1689,48	-3,45544	-3,45502	16,057
3	1062,22	1032,84	843,127	813,45	-802,376	-5,30873
	1032,84	1061,92	843,127	-802,371	813,493	-5,32213
	843,879	843,879	1687,76	-5,54232	-5,55874	13,2571
5	1062,42	1033,04	843,42	813,338	-802,451	-5,42828
	1033,04	1062,13	843,42	-802,45	813,373	-5,44593
	843,727	843,727	1687,45	-5,44386	-5,46115	13,3676
7	1062,6	1033,22	843,654	813,476	-802,595	-5,44064
	1033,22	1062,3	843,654	-802,594	813,511	-5,45824
	843,654	843,654	1687,31	-5,44082	-5,45806	13,3817

Таблица 2.2 – Симметрированные матрицы

$n$	Матрицы					
	$L$ , нГ/м			$C$ , пФ/м		
1	1062,37	1032,96	843,86	810,909	-803,978	-5,77546
	1032,96	1062,07	843,86	-803,978	810,868	-5,82417
	843,86	843,86	1689,48	-5,77546	-5,82417	16,057
3	1062,22	1032,84	843,503	813,456	-802,373	-5,42552
	1032,84	1061,92	843,503	-802,373	813,493	-5,44043
	843,503	843,503	1687,76	-5,42552	-5,44043	13,2571
5	1062,42	1033,04	843,574	813,338	-802,451	-5,43607
	1033,04	1062,13	843,574	-802,451	813,373	-5,45354
	843,574	843,574	1687,45	-5,43607	-5,45354	13,3676
7	1062,6	1033,22	843,654	813,476	-802,595	-5,44073
	1033,22	1062,3	843,654	-802,595	813,511	-5,45815
	843,654	843,654	1687,31	-5,44073	-5,45815	13,3817

Таблица 2.3 – Максимальные значения элементов матриц асимметрии

$n$	Значения, %	
	$L$	$C$
1	0,104	40,678
3	0,045	2,175
5	0,018	0,143
7	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,002

Погонные задержки и время прихода мод, вычисленные из симметрированных матриц  $L$  и  $C$ , приведены в таблице 2.4. Видно, что при  $n=1$   $\tau_1=2,37451$  нс/м, что физически невозможно, поскольку задержки должны быть не меньше 3,3 нс/м, в соответствии скорости света в вакууме. С учащением сегментации точность возрастает: значения  $\tau$  для  $n=3$  и  $n=5$  совпадают до одного знака после запятой, что иногда приемлемо, а для  $n=5$  и  $n=7$  – уже до трех знаков. Это дает возможность при дальнейшем моделировании использовать  $n=5$ , для экономии времени. Пример вычисления временного отклика для  $n=5$  показан на рисунке 2.3. Первые две быстрые моды приходят примерно одновременно и в соответствии со значениями ( $\approx 1$  нс), приведенными в таблице 2.4. Они представлены в виде одного импульса, так как разница задержек импульсов мод очень мала (0,01 нс). Задержка импульса моды 3 также соответствует значению из таблицы 2.4 ( $\approx 2$  нс).

Таблица 2.4 – Погонные задержки и время распространения мод

$n$	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$\tau_3$ , нс/м	$l\tau_1$ , нс	$l\tau_2$ , нс	$l\tau_3$ , нс
1	2,37451	4,04863	6,87312	0,712353	1,214589	2,061936
3	3,64804	3,7405	6,87293	1,094412	1,12215	2,061879
5	3,6581	3,69495	6,87244	1,09743	1,108485	2,061732
7	3,65844	3,69399	6,87285	1,097532	1,108197	2,061855

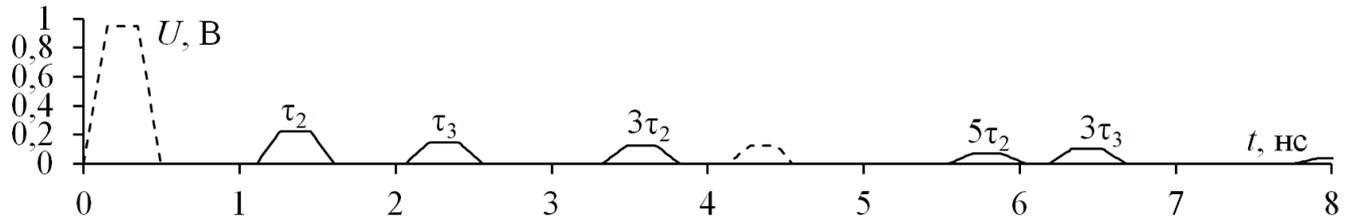


Рисунок 2.3 – Формы напряжения в начале (- -) и конце (-) МФ

### 2.1.3 Моделирование при произвольном наборе параметров

Выполнено моделирование, подтверждающее разложение СКИ в таком МФ при произвольном наборе параметров:  $w=0,5$  мм,  $s=0,4$  мм,  $h=0,1$  мм,  $t=105$  мкм,  $\epsilon_r=5$  при длине линии  $l=1$  м. В качестве входного воздействия использовался источник трапециевидных импульсных сигналов, представленный источником э.д.с. с амплитудой – 2 В, временем нарастания – 150 пс, плоской вершины – 200 пс и спада – 150 пс. Форма такого импульса позволяет четко определять время прихода импульсов мод на выходе МФ, а также он очень схож с полезным цифровым сигналом.

В результате моделирования получены матрицы **L**, **C** и матрица погонных задержек  $\tau$ , представленные в таблице 2.5, а формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунке 2.4. Импульс 1 с задержкой 3,860 нс имеет пренебрежительно малую амплитуду и не виден. Импульс 2 приходит с задержкой 4,043 нс и амплитудой 0,341 В, а импульс 3 – 6,755 нс и 0,344 В. Работа МФ определяется разностью задержек и амплитудами импульсов 2 и 3. Так,  $\tau_3 - \tau_2 = 2,712$  нс/м, а ослабление составляет 2,93 раза (здесь и далее по отношению к половине э.д.с.).

Таблица 2.5 – Матрицы  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\boldsymbol{\tau}$ 

$\mathbf{C}$ , пФ/м	$\begin{bmatrix} 26,705 & -24,358 & -1,173 \\ -24,358 & 26,820 & -1,230 \\ -1,173 & -1,230 & 29,347 \end{bmatrix}$
$\mathbf{L}$ , нГн/м	$\begin{bmatrix} 604,58 & 510,174 & 429,398 \\ 510,174 & 594,271 & 429,397 \\ 429,398 & 429,397 & 858,774 \end{bmatrix}$
$\boldsymbol{\tau}$ , нс/м	$\begin{bmatrix} 6,755 & 0 & 0 \\ 0 & 4,043 & 0 \\ 0 & 0 & 3,860 \end{bmatrix}$ .

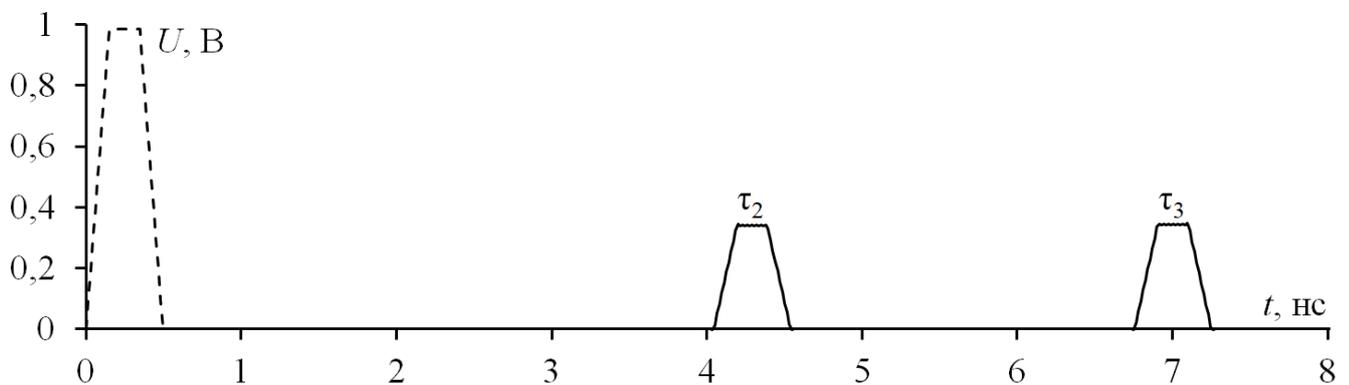


Рисунок 2.4 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

В результате, выполнено моделирование МФ с пассивным проводником, полученным за счет вырезов в опорной плоскости МПЛ. Оно показало, что такой МФ имеет перспективы дальнейшего использования, так как амплитуда импульса на выходе в 3 раза меньше, чем на входе. Так, используя пассивный проводник в опорной плоскости, в дальнейшем могут быть созданы другие структуры, обеспечивающие еще большее ослабление СКИ, распространяющегося по МФ.

### 2.1.4 Оптимизация значения сопротивлений

В пункте 2.1.1 показано, что в МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости можно достичь ослабления СКИ в 3 раза. Между тем можно предположить, что существуют значения сопротивлений на концах структуры, которые дадут меньшую амплитуду выходного сигнала.

Выполнено моделирование временного отклика на воздействие импульса при изменении значения  $R_2$  и  $R_4$  (рисунок 2.2). Параметры структуры представлены в пункте 2.1.1. Моделирование показало близкие значения погонных задержек двух быстрых мод ( $\tau_1=3,88$  нс/м и  $\tau_2=4,06$  нс/м) и более высокое значение для моды 3 ( $\tau_3=6,77$  нс/м), так что  $\tau_3-\tau_2=2,71$  нс/м. С увеличением  $R$  амплитуда импульса 1 уменьшается, а импульса 2 – увеличивается. Так, при  $R=100$  Ом амплитуда импульса 1 0,458 В, а импульса 2 – 0,219 В. Для  $R=59$  Ом эти значения 0,334 В и 0,353 В соответственно. В итоге, при  $R=61$  Ом выполняется разложение исходного сигнала на два импульса одинаковой и минимальной амплитуды 0,34 В, а ослабление составляет 3 раза. Вычисленные формы напряжения на входе и выходе МФ при разных значениях  $R$  приведены на рисунке 2.5.

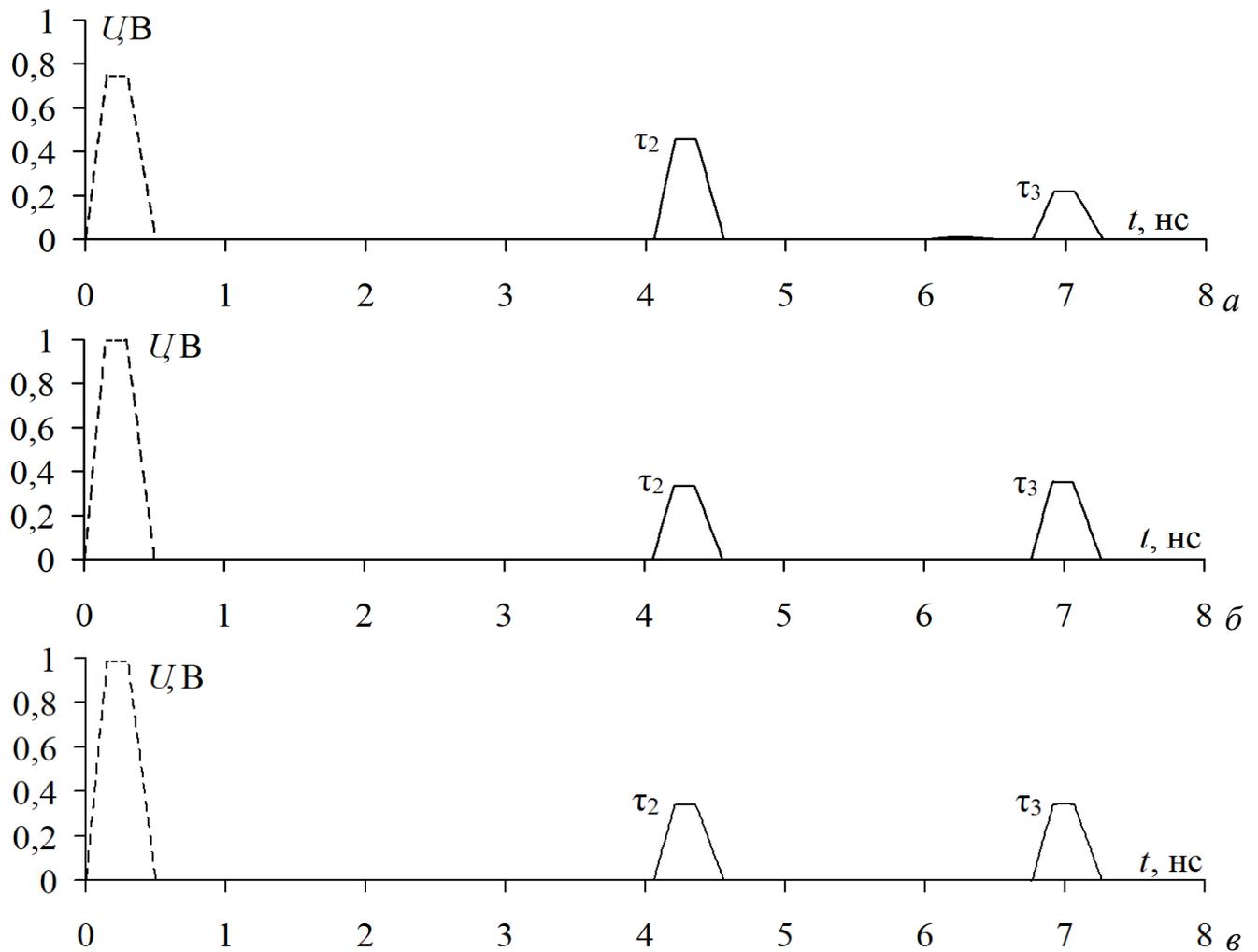


Рисунок 2.5 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $R=100$  (а), 59 (б), 61 (в) Ом

Таким образом, показано уменьшение амплитуды сигнала на выходе рассматриваемого МФ за счет выбора значения сопротивления 61 Ом.

### 2.1.5 Оптимизация по двум отдельным критериям

Здесь представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения на разложение СКИ по двум основным критериям: максимизация разности погонных задержек мод и минимизация амплитуды импульсов разложения за счет их выравнивания.

### 2.1.5.1 Влияние параметров на погонные задержки мод

Выполнено моделирование влияния параметров поперечного сечения на разность погонных задержек мод. Оно выполнялось для следующих параметров: ширина всех проводников ( $w$ ) менялась одинаково в диапазоне от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1 мм,  $h=0,5; 1,0; 1,5; 2$  мм,  $s=0,2; 0,3; 0,4$  мм и  $t=18, 35$  и  $70$  мкм. Отклики вычислялись при  $l=1$  м.

В таблице 2.6 приведены полученные зависимости в диапазоне параметров при  $t=18$  мкм. Анализ данных из таблицы 2.6 показывает наличие экстремумов, причина которых может быть связана с погрешностями моделирования. Однако везде явно выражены три моды с различными значениями их погонных задержек. При этом значение погонной задержки моды 3 всегда существенно выше первой и второй, значения которых имеют тенденцию к сближению, особенно выраженную при  $s=0,2$  мм и  $h=2$  мм. Так, на рисунке 2.6 приведены результаты моделирования при  $h=0,5$  мм,  $w=1$  мм,  $s=0,4$  мм (наблюдается максимальная разность погонных задержек 1,52 нс/м) и при  $h=2$  мм,  $w=0,5$  мм,  $s=0,2$  мм (наблюдается минимальная разность погонных задержек 0,35 нс/м).

При изменении  $h$ ,  $w$ ,  $s$  и  $t$  получено 48 графиков, но приведены результаты лишь для наилучших результатов. На рисунке 2.7 приведены зависимости  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_3-\tau_2$  от  $w$  для разных значений  $t$  при  $h=0,5$  мм и  $s=0,4$  мм. Также наблюдаются близкие значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  и гораздо большие значения  $\tau_3$ . Для  $\tau_1$  и  $\tau_2$  наблюдается максимум в точке  $w=0,2$  мм, а далее идет монотонное убывание, тогда как для  $\tau_3$  – возрастание. Из рисунка 2.7г видно, что с увеличением  $t$  разность погонных задержек мод становится не значительно больше. Так, максимальная разность погонных задержек мод составляет 1,56 нс/м при  $t=70$  мкм и  $w=1$  мм.

Таблица 2.6 – Зависимости  $\tau_1$  (- -),  $\tau_2$  (—),  $\tau_3$  (-) от  $w$  для  $s=0,2; 0,3; 0,4$  мм и  $h=0,5; 1; 1,5; 2$  мм

$h$ , мм	$s=0,2$ мм	$s=0,3$ мм	$s=0,4$ мм
0,5			
1			
1,5			
2			

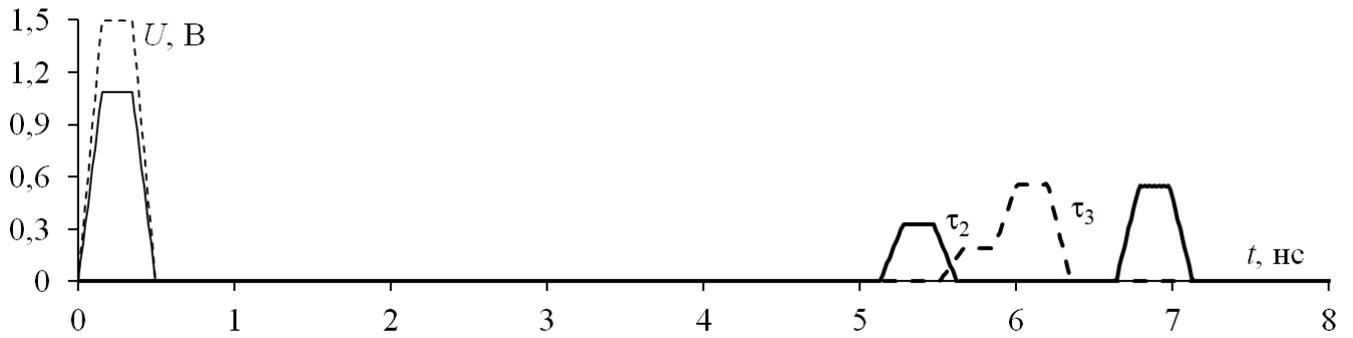


Рисунок 2.6 – Формы напряжения на входе (—) и выходе (---) МФ при  $h=0,5$  мм,  $w=1$  мм,  $s=0,4$  мм и входе (---) и выходе (---) МФ при  $h=2$  мм,  $w=0,5$  мм,  $s=0,2$  мм

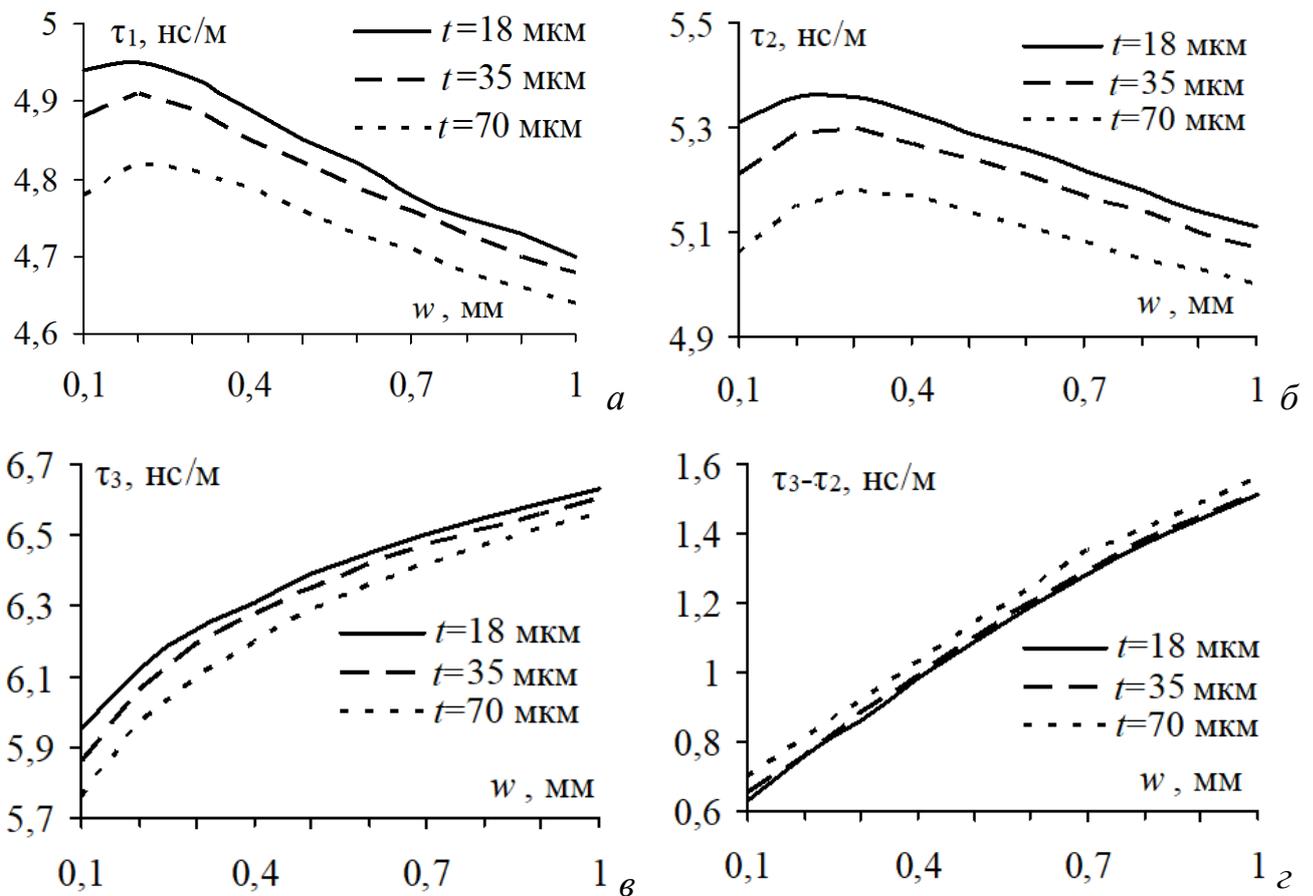


Рисунок 2.7 – Зависимости  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б),  $\tau_3$  (в),  $\tau_3-\tau_2$  (г) от  $w$  при разных  $t$  для  $s=0,4$  мм и  $h=0,5$  мм

Вычислен временной отклик на входе и выходе МФ (рисунок. 2.8). Первый импульс с задержкой 4,64 нс имеет пренебрежительно малую амплитуду и не виден. Второй импульс приходит с задержкой 5 нс, а третий – 6,56 нс.

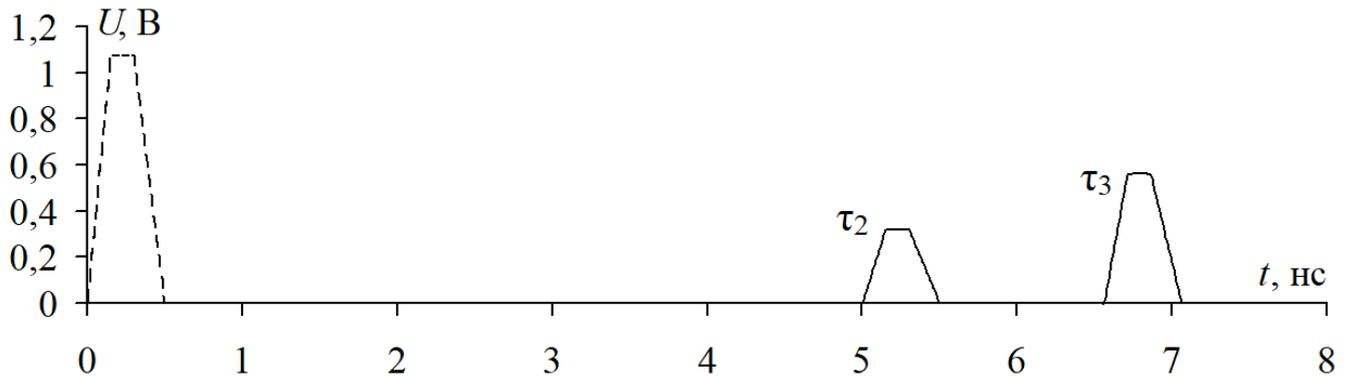


Рисунок 2.8 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

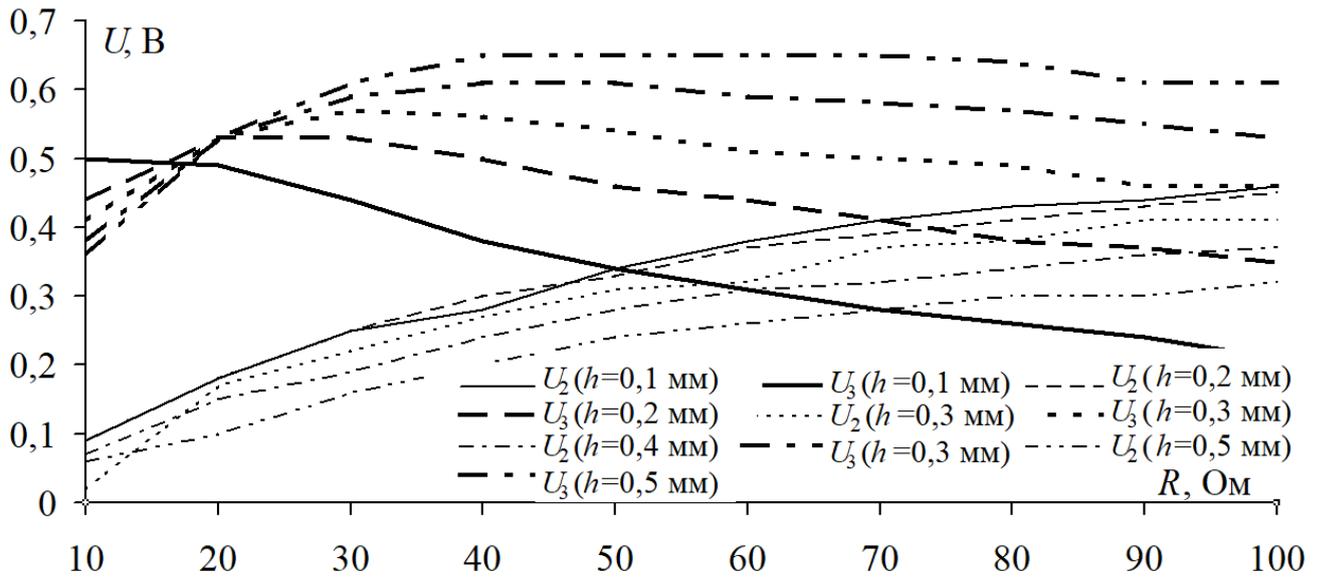
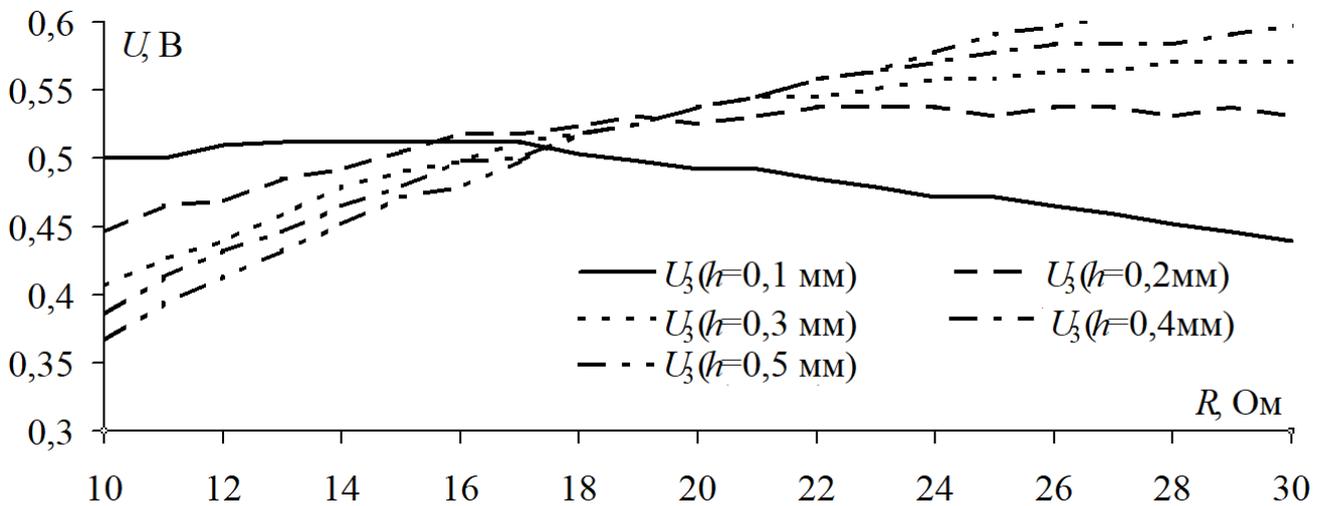
при  $s=0,4$  мм,  $h=0,5$  мм,  $w=1$  мм и  $t=70$  мкм

Таким образом, показано, что в большей степени на разность погонных задержек мод влияет  $s$ ,  $w$  и  $h$  и в меньшей –  $t$ . Так, для ее увеличения надо увеличивать  $s$ ,  $w$  и  $t$  и уменьшать  $h$ .

### 2.1.5.2 Влияние параметров структуры на амплитуду импульсов

В рассматриваемом МФ обеспечивается лицевая связь. Поэтому важно оценить влияние  $h$  на выходные характеристик МФ. Значения параметров:  $w=0,5$  мм,  $s_1=s_2=0,4$  мм,  $t=105$  мкм,  $h=0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,5; 2$  мм.

На рисунке 2.9 приведены зависимости амплитуд импульсов разложения (второго –  $U_2$  и третьего –  $U_3$ ) от  $R$ , при  $h=0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм. Видно, что зависимости для  $h=0,1$  мм детализируют результаты из п. 2.1.3, когда с ростом  $R$  значение  $U_2$  монотонно увеличивалось, а  $U_3$  – уменьшалось, так что в точке их пересечения при  $R=61$  Ом эти значения выравнивались, и амплитуда общего сигнала оказалась минимальной. С ростом значения  $h$  точка пересечения зависимостей смещается вправо и вверх. Однако у зависимости  $U_3$  появляется максимум за счет все большего уменьшения, с ростом значения  $h$ , значения  $U_3$ , при малых значениях  $R$ . Примечательна также точка ( $R \approx 20$  Ом) минимальной чувствительности  $U_3$  к изменению  $h$ . На рисунке 2.10 более детально показана нулевая чувствительность в диапазоне  $R$  от 10 до 30 Ом.

Рисунок 2.9 – Зависимости  $U_2$  и  $U_3$  от  $R$  при разных  $h$ Рисунок 2.10 – Зависимости  $U_3$  от  $R$  при разных  $h$ 

На рисунке 2.11 приведены зависимости погонных задержек от  $h$ . Видно, что при увеличении  $h$  уменьшается максимальная разность задержек мод: если для  $h=0,1$  мм она составляет 2,16 нс/м, то для  $h=2$  мм – 0,57 нс/м.

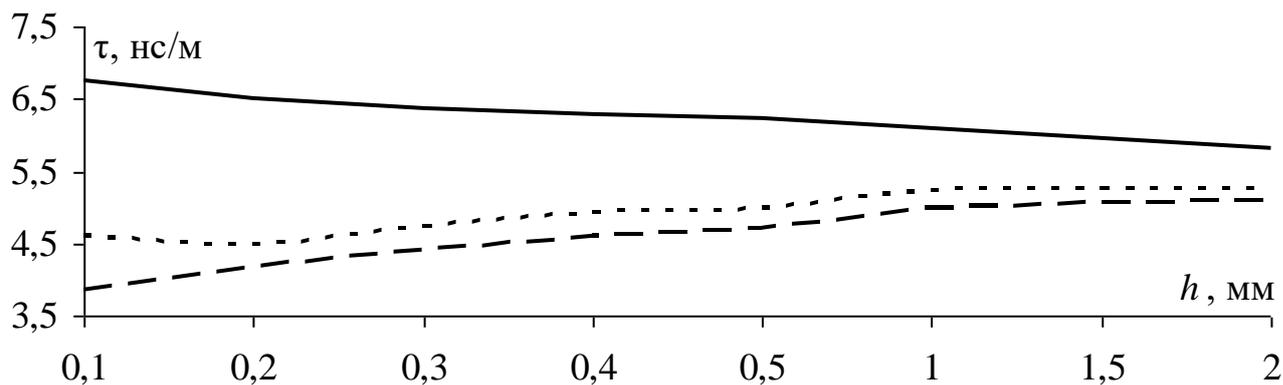


Рисунок 2.11 – Зависимости  $\tau_1$  (· · ·),  $\tau_2$  (— —),  $\tau_3$  (—) от  $h$

Выполнено моделирование влияния и других параметров поперечного сечения на амплитуду импульсов. Так, моделирование выполнялось в диапазоне следующих параметров:  $w$  менялась в диапазоне от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1 мм,  $h=0,5; 1,0; 1,5; 2$  мм,  $s=0,2; 0,3; 0,4$  мм и  $t=18, 35$  и 70 мкм.

Получены зависимости для всех значений изменяемых параметров, но приведены лишь показательные. На рисунке 2.12 приведены зависимости амплитуд двух основных импульсов разложения ( $U_2$  и  $U_3$ ) от  $w$ , при разных значениях  $h$ ,  $s$  и  $t$ . Видно, что на амплитуду импульсов больше всего влияют  $w$  и  $h$ . Например, при увеличении  $w$  и уменьшении  $h$  амплитуды уменьшаются и стремятся к выравниванию. Также видно, что при меньших  $s$  и  $t$  наблюдается максимум в точке  $w=0,3$  мм для  $U_2$ , а далее идет монотонное убывание и сближение с  $U_3$ . Так, для уменьшения амплитуды импульсов разложения надо увеличивать  $w$  и  $s$ , а также уменьшать  $h$  и  $t$ . Анализ графиков показал, что минимальная амплитуда напряжения (0,546 В) на выходе МФ будет при  $w=1$  мм,  $h=0,5$  мм,  $s=0,4$  мм и  $t=18$  мкм. Формы напряжения, для такого набора параметров, приведены на рисунке 2.14. В итоге, получено ослабление в 1,83 раза.

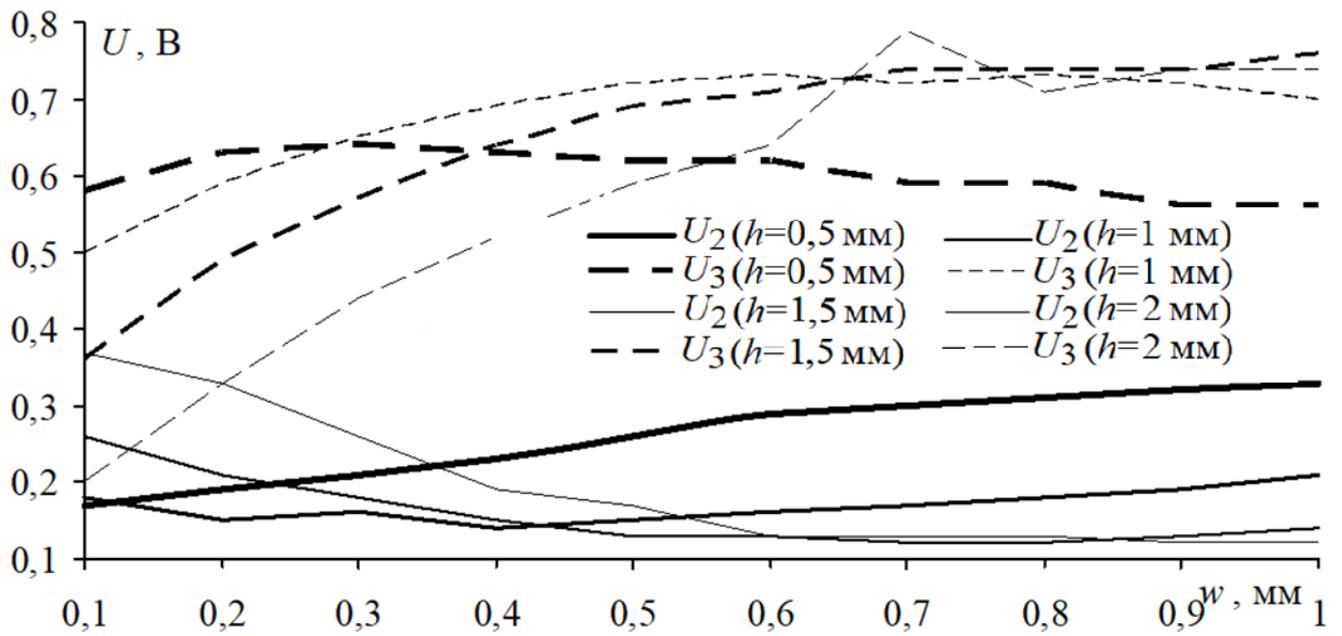


Рисунок 2.12 – Зависимости  $U$  от  $w$  для разных  $h$ ,  $s=0,4$  мм и  $t=70$  мкм

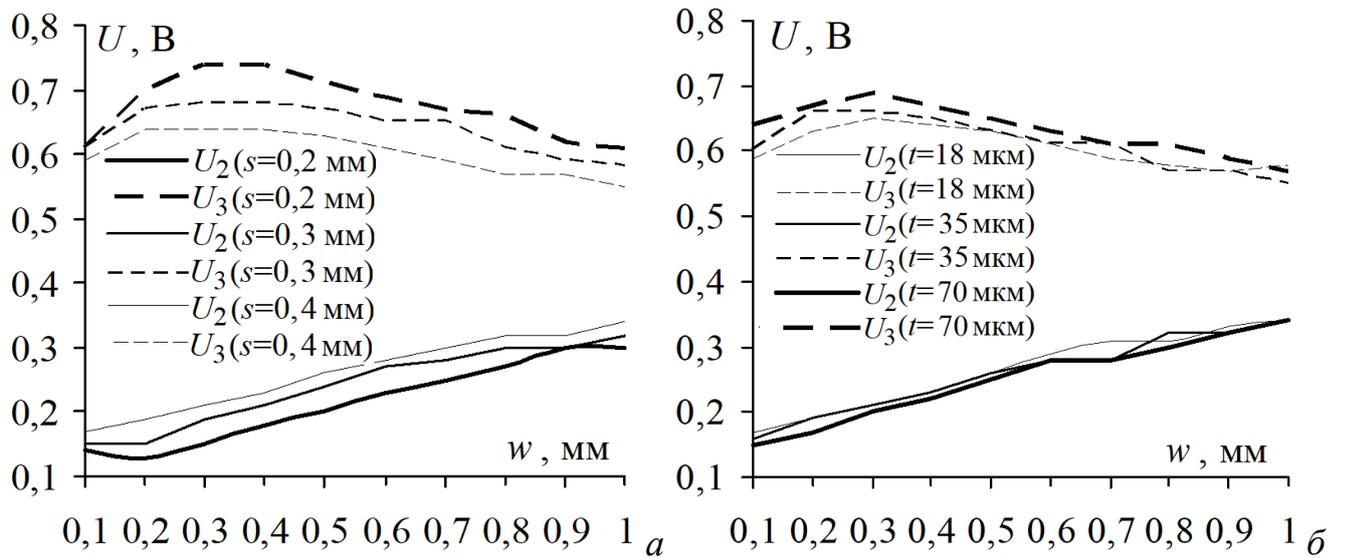


Рисунок 2.13 – Зависимость  $U$  от  $w$  при разных значениях  $s$  (а),  $t$  (б) и  $h=0,5$  мм

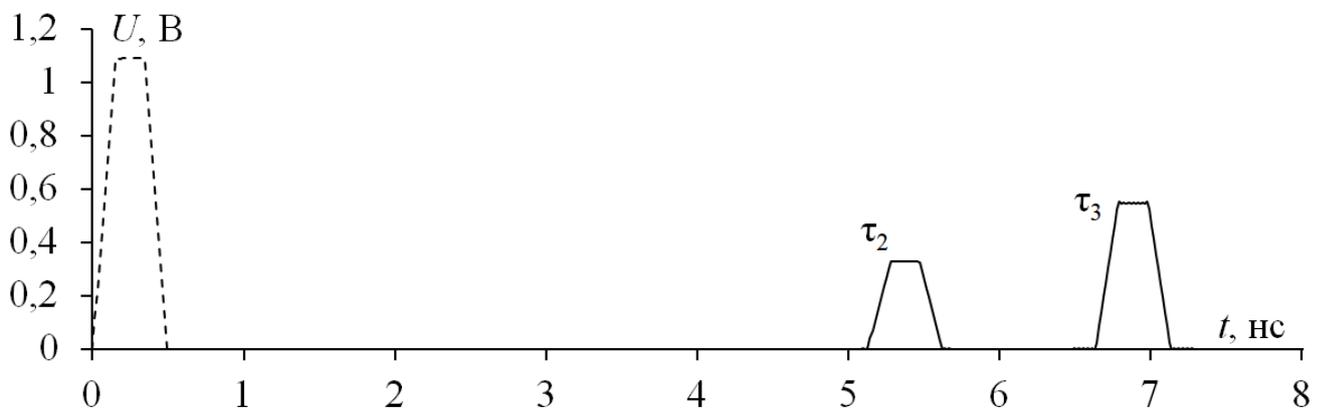


Рисунок 2.14 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при  $w=1$  мм,  $h=0,5$  мм,  $s=0,4$  мм и  $t=18$  мкм

## 2.2 Влияние асимметрии поперечного сечения модального фильтра на его характеристики

Здесь представлены результаты влияния асимметрии поперечного сечения на погонные задержки и амплитуду импульсов разложения в МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости.

Когда структура МФ симметрична, достигается выравнивание амплитуд импульсов, но не разности погонных задержек мод МФ. При этом две быстрые моды приходили примерно одновременно, с разницей в 0,01 нс/м, образуя на выходе МФ один импульс, а разница погонных задержек мод 2 и 3 была достаточно большой (3,18 нс/м). Поэтому выполнено исследование влияния асимметрии на разность погонных задержек мод и амплитуду импульсов.

Моделирование выполнено с типовыми параметрами фольгированного стеклотекстолита  $t=35$  мкм и  $h=0,18$  мм при длине МФ  $l=1$  м,  $w_1=w_2=3,5$  мм и  $w_3=0,5$  мм. Асимметрия получена изменением  $s_1$  от 3,5 до 0,5 мм при  $s_2=3,5$  мм, т.е. приближением одного из опорных проводников (левого) к пассивному. Зависимости погонных задержек  $\tau$  от  $s_1$  приведены на рисунке 2.15а. Видно, что основное влияние  $s_1$  имеет на  $\tau_2$ . Так, при уменьшении  $s_1$  значение  $\tau_2$  изменяется от 3,69 до 4,13 нс/м, а  $\tau_1$  – от 3,65 до 3,67 нс/м, т.е.  $\tau_2-\tau_1$  увеличивается от 0,04 до 0,46 нс/м, а  $\tau_3$  не меняется (6,87 нс/м).

На рисунке 2.15б приведены зависимости амплитуд импульсов на выходе МФ. Видно, что при  $s_1=2,3$  мм  $U_1$  прерывается, а  $U_2$  резко увеличивается. Это объясняется тем, что разность  $\tau_2-\tau_1$  ( $s_1=2,3$  мм) становится малой, и происходит наложение импульсов со сложением амплитуд  $U_1$  (0,04 В) и  $U_2$  (0,019 В). Также видно, что их результирующая амплитуда становится меньше с увеличением  $s_1$ , а  $U_3$  меняется незначительно. На рисунке 2.16 показаны примеры результатов моделирования формы напряжения на входе и выходе МФ. Из рисунков 2.16б, в видно появление двух дополнительных импульсов отрицательной полярности, с другими значениями задержек мод, между двумя импульсами с тройным проходом по линии ( $3\tau_1$  и  $3\tau_2$ ). Анализируя рисунок 2.16, можно сделать вывод,

что асимметрия структуры МФ влияет на появление дополнительных импульсов. Так, при  $s_1=0,5$  мм их, явно выраженных, два (рисунок 2.16а), при  $s_1=1,5$  мм он один (рисунок 2.16б), а при  $s_1=3,5$  мм, когда структура МФ полностью симметрична, их нет (рисунок 2.16а).

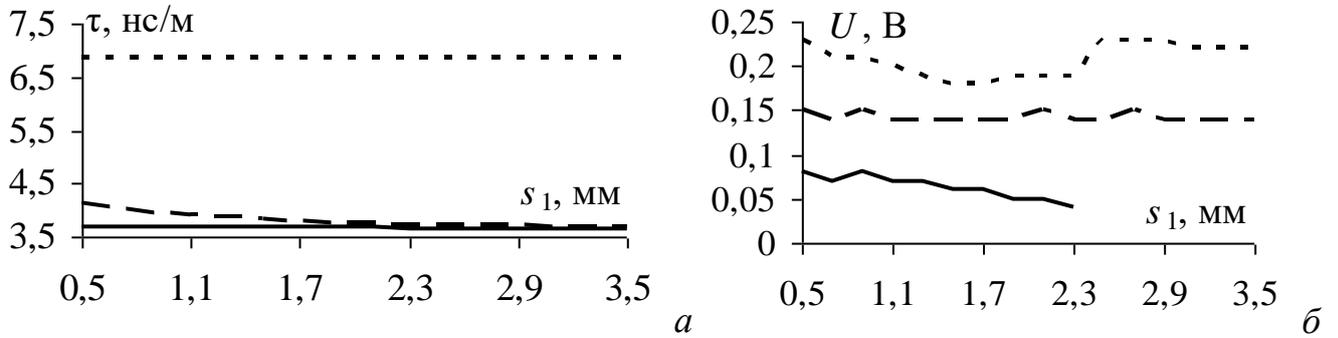


Рисунок 2.15 – Зависимости  $\tau_1$  (—),  $\tau_2$  (---),  $\tau_3$  (- -) (а) и  $U_1$  (—),  $U_2$  (---),  $U_3$  (- -) (б) от  $s_1$

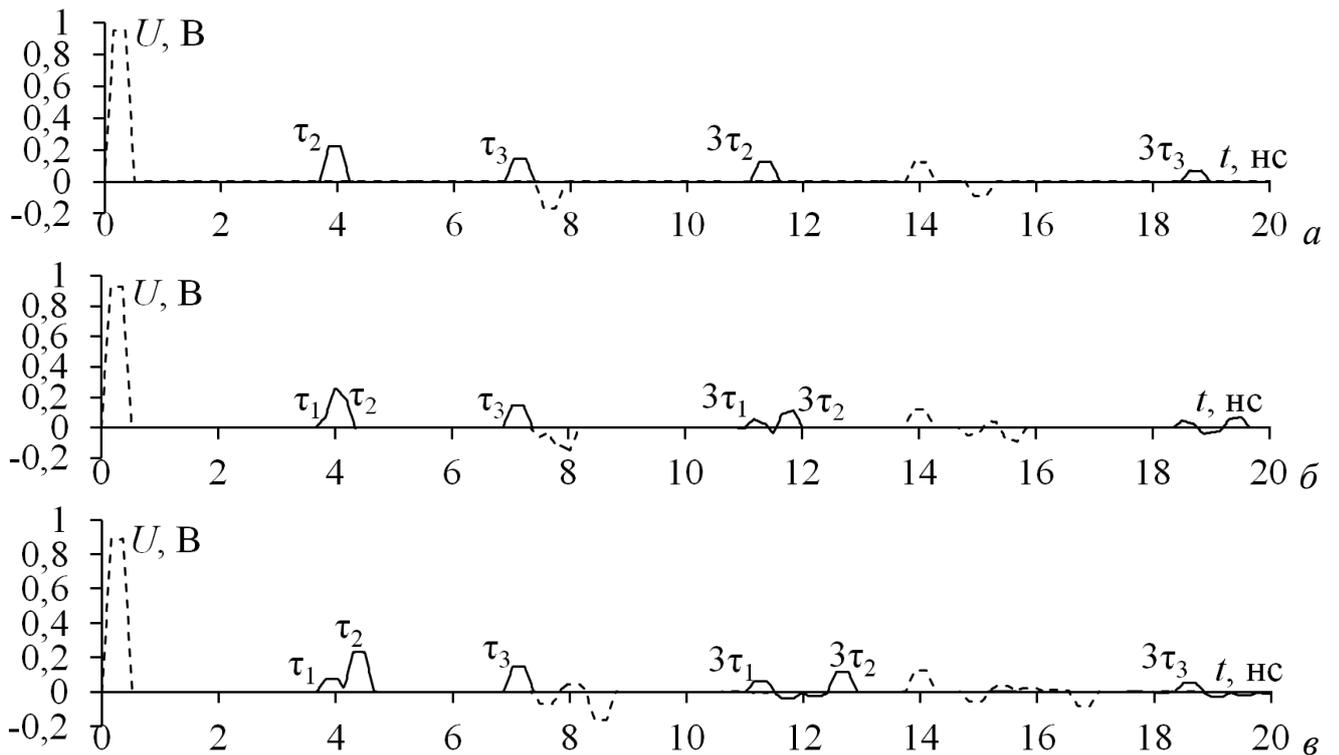


Рисунок 2.16 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе(-) МФ при  $s_1=3,5$  (а), 1,5 (б), 0,5 (в) мм

Удаление двух верхних опорных проводников позволяет ввести еще большую асимметрию в поперечном сечении. Так, рассмотрено изменение ширины активного и пассивного проводников при  $w_3=0,5$  мм,  $s_1=0,5$  мм,  $s_2=3,5$  мм.

При  $w_2=3,5$  мм менялось значение  $w_1$  от 0,9 до 3,3 мм, а при  $w_1=3,5$  мм –  $w_2$  от 1,9 до 3,3 мм.

Соответствующие зависимости погонных задержек мод  $\tau$  приведены на рисунке 2.17. Видно, что изменение  $w_2$  больше всего влияет на  $\tau_2$ , тогда как изменение  $w_1$  на  $\tau_2$  влияет незначительно. При уменьшении  $w_2$  видно монотонное возрастание  $\tau_2$ , что позволяет достичь при некоторых значениях  $w_2$  почти одинаковой разности погонных задержек мод. Так, при  $w_2=2,3$  мм значения погонных задержек мод:  $\tau_1=3,70$  нс/м,  $\tau_2=5,28$  нс/м и  $\tau_3=6,73$  нс/м, соответственно  $\tau_2-\tau_1=1,58$  нс/м и  $\tau_3-\tau_2=1,45$  нс/м. Значение  $\tau_1$  изменяется от 3,67 до 3,71 нс/м, а  $\tau_3$  – от 3,65 до 3,68 нс/м. При уменьшении  $w_1$  значение  $\tau_1$  остается неизменным,  $\tau_2$  изменяется с 4,11 до 4,14 нс/м, а  $\tau_3$  – от 6,85 до 6,38 нс/м.

Зависимости амплитуд на выходе МФ показаны на рисунке 2.18. Видно, что уменьшение  $w_1$  больше всего влияет на  $U_3$ , а  $w_2$  – на  $U_2$ . Амплитуды  $U_3$  и  $U_2$  возрастают. Увеличение  $w_1$  позволяет уменьшить амплитуду  $U_3$  (от 0,23 до 0,16 В), которая при изменении  $w_2$  увеличивается (от 0,24 В до 0,37 В). Так, при  $w_1=2,3$  мм имеет  $U_1=0,067$  В,  $U_2=0,21$  В и  $U_3=0,22$  В, тогда как при  $w_2=2,3$  мм –  $U_1=0,068$  В,  $U_2=0,35$  В и  $U_3=0,169$  В. Видно, что при  $w_1=2,3$  мм амплитуды  $U_2$  и  $U_3$  почти одинаковы. Также наблюдается небольшое уменьшение амплитуды  $U_1$ : от 0,07 до 0,05 В при уменьшении  $w_1$  и от 0,078 до 0,06 В при  $w_2$ . Формы напряжения на входе и выходе МФ показаны на рисунке 2.19.

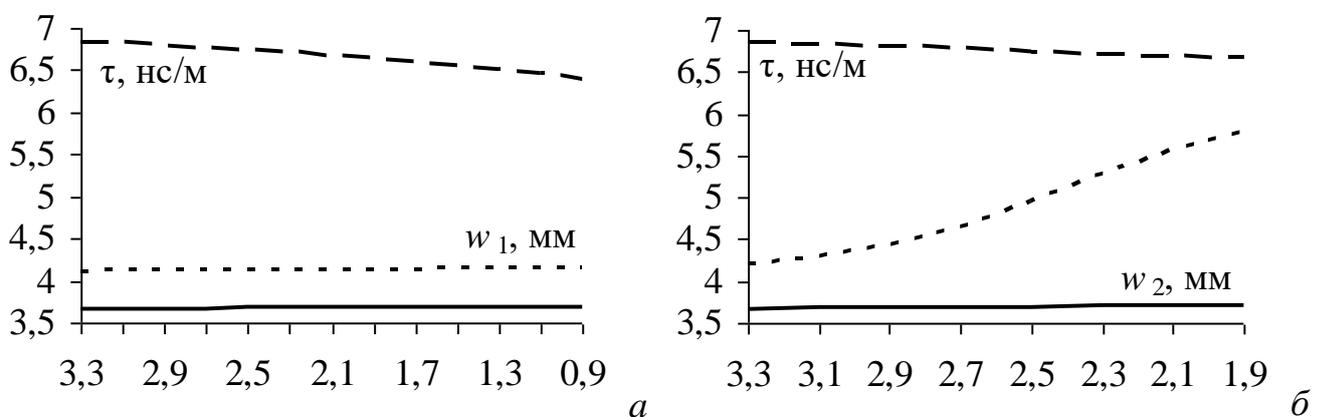


Рисунок 2.17 – Зависимости  $\tau_1$  (-),  $\tau_2$  (- -),  $\tau_3$  (- · -) от  $w_1$  при  $w_2=3,5$  мм (а) и  $w_2$  при  $w_1=3,5$  мм (б)

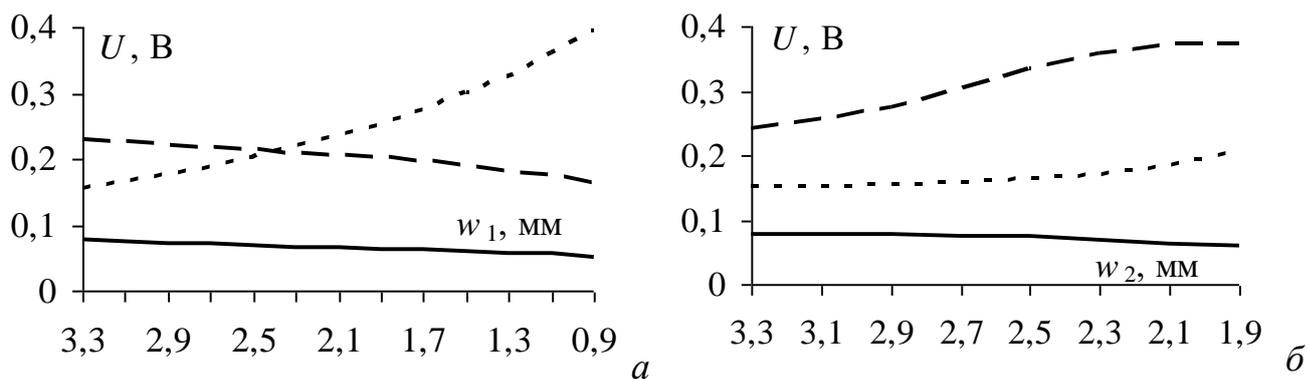


Рисунок 2.18 – Зависимости  $U_1(-)$ ,  $U_2(- -)$ ,  $U_3(- \cdot -)$   
от  $w_1$  при  $w_2=3,5$  мм (а) и  $w_2$  при  $w_1=3,5$  мм (б)

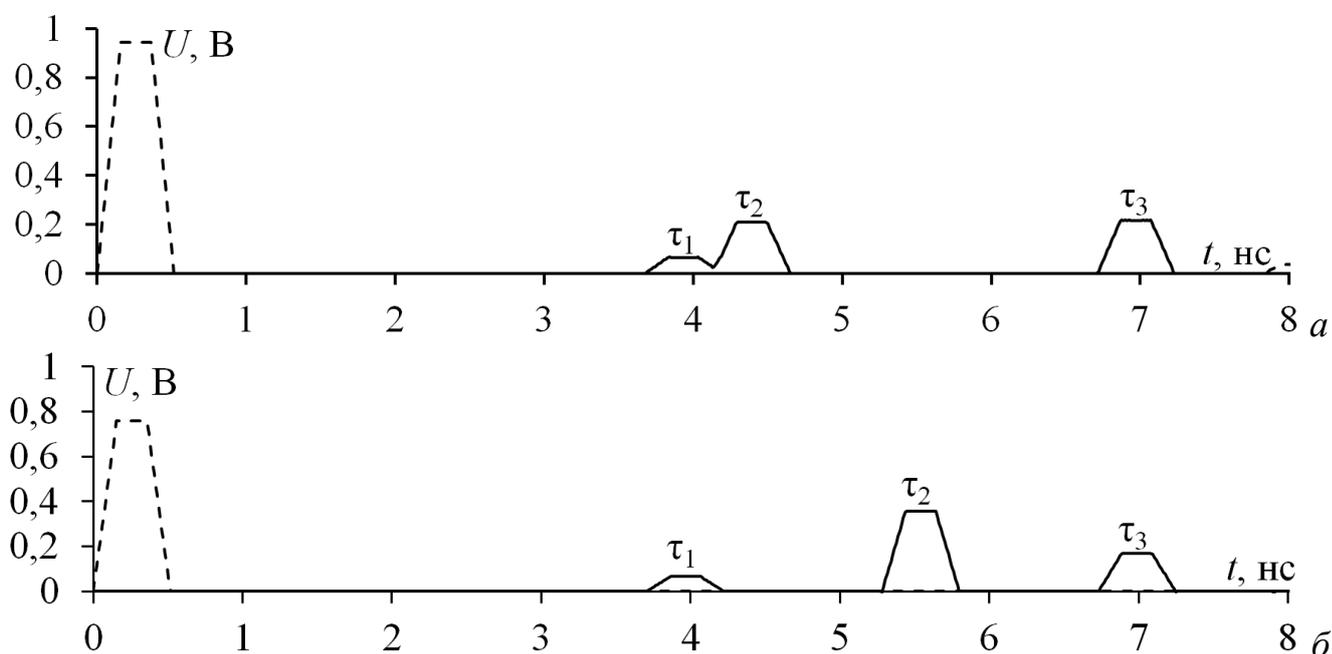


Рисунок 2.19 – Формы напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ  
при  $w_1=3,5$  мм и  $w_2=2,3$  мм (а) и  $w_1=2,3$  мм и  $w_2=3,5$  мм (б)

Таким образом, показано влияние ширины активного и пассивного проводников асимметричного МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости. Уменьшение ширины пассивного проводника, позволило разложить импульсы двух быстрых мод (разницы их погонных задержек составили  $\tau_2 - \tau_1 = 1,58$  нс/м и  $\tau_3 - \tau_2 = 1,45$  нс/м). Уменьшение ширины активного проводника позволило выровнять и уменьшить амплитуду второй моды ( $U_1 = 0,067$  В,  $U_2 = 0,21$  В и  $U_3 = 0,22$  В).

### 2.3 Дополнительные импульсы во временном отклике

Здесь представлены результаты исследования дополнительных импульсов во временном отклике МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости.

Детальное исследование временных откликов показало наличие дополнительных импульсов, которые появляются при изменении граничных условий на концах пассивного проводника и введении асимметрии в поперечное сечение МФ. Так, детально появление дополнительных импульсов исследовано при  $t=35$  мкм,  $h=0,18$  мм,  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм,  $s_2=3,5$  мм и изменении  $s_1$  от 3,5 до 0,5 мм, когда их появление видно более четко. Для исследования дополнительных импульсов длина линии увеличена до 2,5 м.

В таблицах 2.7 и 2.8 приведены значения погонных задержек и времени прихода мод. Формы напряжения на выходе МФ показаны на рисунке 2.20. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что задержки дополнительных импульсов определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии. В таблице 2.9 приведены получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов 1–6. Анализ рисунка 2.20 и таблицы 2.9 позволяет сделать вывод, что с увеличением  $s_1$  интервалы между дополнительными импульсами и амплитуда становятся меньше: если при  $s_1=0,5$  мм интервал равен 1,162 нс, а  $U_1=0,38$  В, то при  $s_1=1,1$  мм – 0,588 нс и  $U_1=0,28$  В. Это приводит к исчезновению дополнительных импульсов, что подтверждает рисунок 2.20а для  $s_1=3,5$  мм, где их нет. Также видно, что их становится на 2 больше (если при  $3\tau$  есть 2 дополнительных импульса, то при  $5\tau$  их 4), а их амплитуды уменьшаются.

Таблица 2.7 – Одинарные и тройные погонные задержки мод (нс/м)

$s_1$ мм	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$3\tau_1$	$3\tau_2$	$3\tau_3$
3,5	3,658	3,695	6,872	10,974	10,95	20,616
1,1	3,670	3,906	6,872	11,01	11,718	20,616
0,5	3,670	4,135	6,872	11,01	12,405	20,616

Таблица 2.8 – Время (нс) прихода импульсов мод при разных  $s_1$ 

$s_1$ мм	$\tau_1 l$	$\tau_2 l$	$\tau_3 l$	$3\tau_1 l$	$3\tau_2 l$	$3\tau_3 l$	$5\tau_1 l$	$5\tau_2 l$
3,5	9,145	9,237	17,181	27,43	27,712	51,543	45,726	46,187
1,1	9,176	9,764	17,181	27,529	29,292	51,543	45,883	48,821
0,5	9,176	10,338	17,181	27,528	31,014	51,541	45,879	51,691

Таблица 2.9 – Время (нс) прихода дополнительных импульсов при  $s_1=1,1$  и  $0,5$  мм

№ импульса	1	2	3	4	5	6
Комбинация	$l(2\tau_1+\tau_2)$	$l(\tau_1+2\tau_2)$	$l(4\tau_1+\tau_2)$	$l(3\tau_1+2\tau_2)$	$l(2\tau_1+3\tau_2)$	$l(\tau_1+4\tau_2)$
$s_1=1,1$ мм	28,117	28,705	46,471	47,059	47,647	48,235
$s_1=0,5$ мм	28,69	29,852	47,041	48,203	49,365	50,527

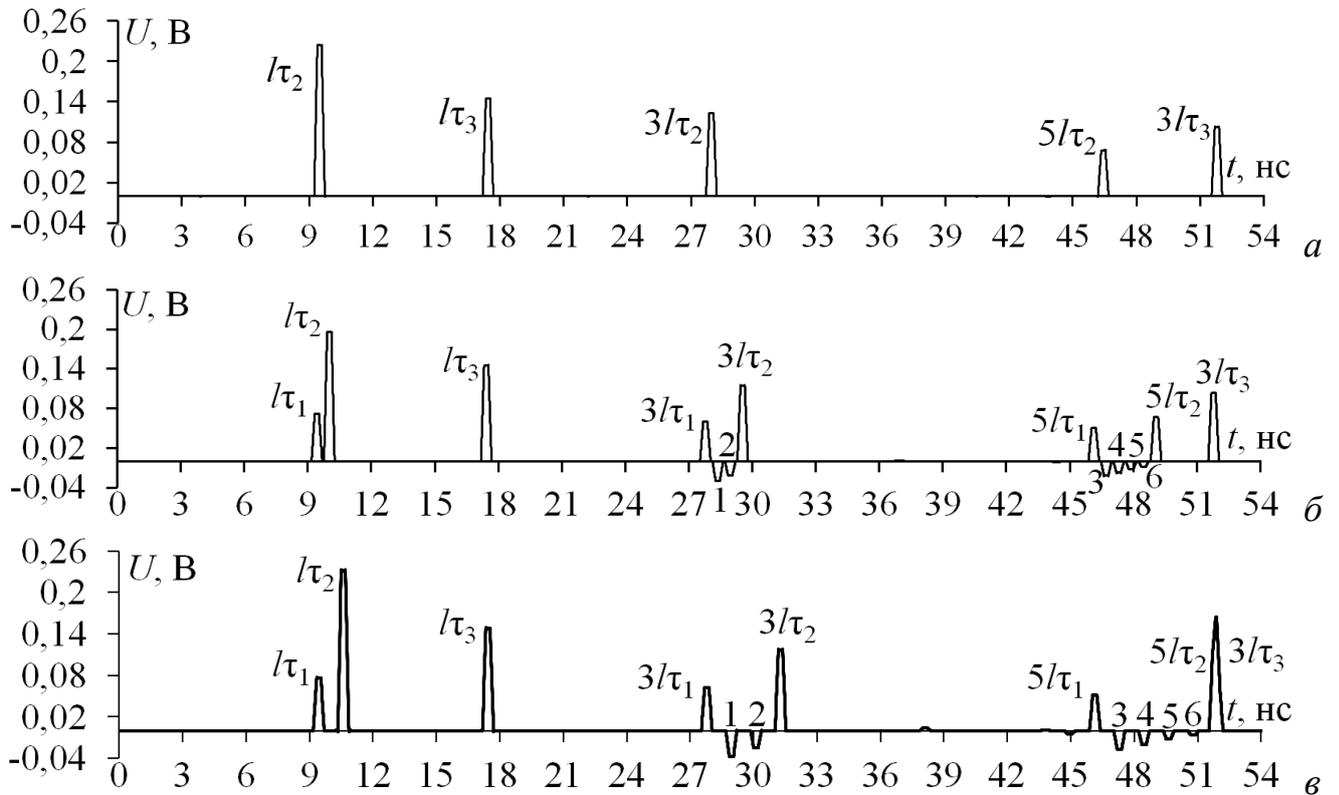


Рисунок 2.20 – Формы напряжения на выходе МФ

при  $s_1=3,5$  (а),  $1,1$  (б),  $0,5$  (в) мм и  $l=2,5$  м

Исследовано появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника: КЗ-ХХ, КЗ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-ХХ. Это изменение, из-за отсутствия резисторов, позволяет увеличить срок службы МФ и уменьшить его стоимость. Моделировалось влияние режимов включения «начало-конец» пассивного проводника: КЗ-ХХ, КЗ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-ХХ. КЗ моделировалось как  $10^{-3}$  Ом, а ХХ –  $10^5$  Ом.

Для всех значений  $s_1$  и режимов включения пассивного проводника вычислены формы напряжения, но приведены только для ХХ-КЗ, так как наибольшее ослабление (входного сигнала) происходит именно в этом режиме. На рисунке 2.21 показаны результаты моделирования форм напряжения на выходе МФ при  $s_1=3,3; 1,1; 0,5$  мм. На рисунке 2.21а наблюдаются 2 импульса (на нём они обозначены как 1, 2, а на рисунках 2.21б, в – как 2, 4), амплитуда которых больше амплитуды импульсов мод. В таблицах 2.10 и 2.11 приведены погонные задержки мод. Анализ таблиц 2.10 и 2.11 и рисунок 2.21 показал, что импульсы 1 и 2 (рисунок 2.21а) и 1–4 (рисунок 2.21б, в) являются дополнительными импульсами, т.к. они приходят с другими задержками. Также на рисунках 2.21б, в, как и ранее на рисунках 2.20б, в появляются слабо выраженные дополнительные импульсы отрицательной полярности между импульсами  $3\tau_1$  и  $3\tau_2$ .

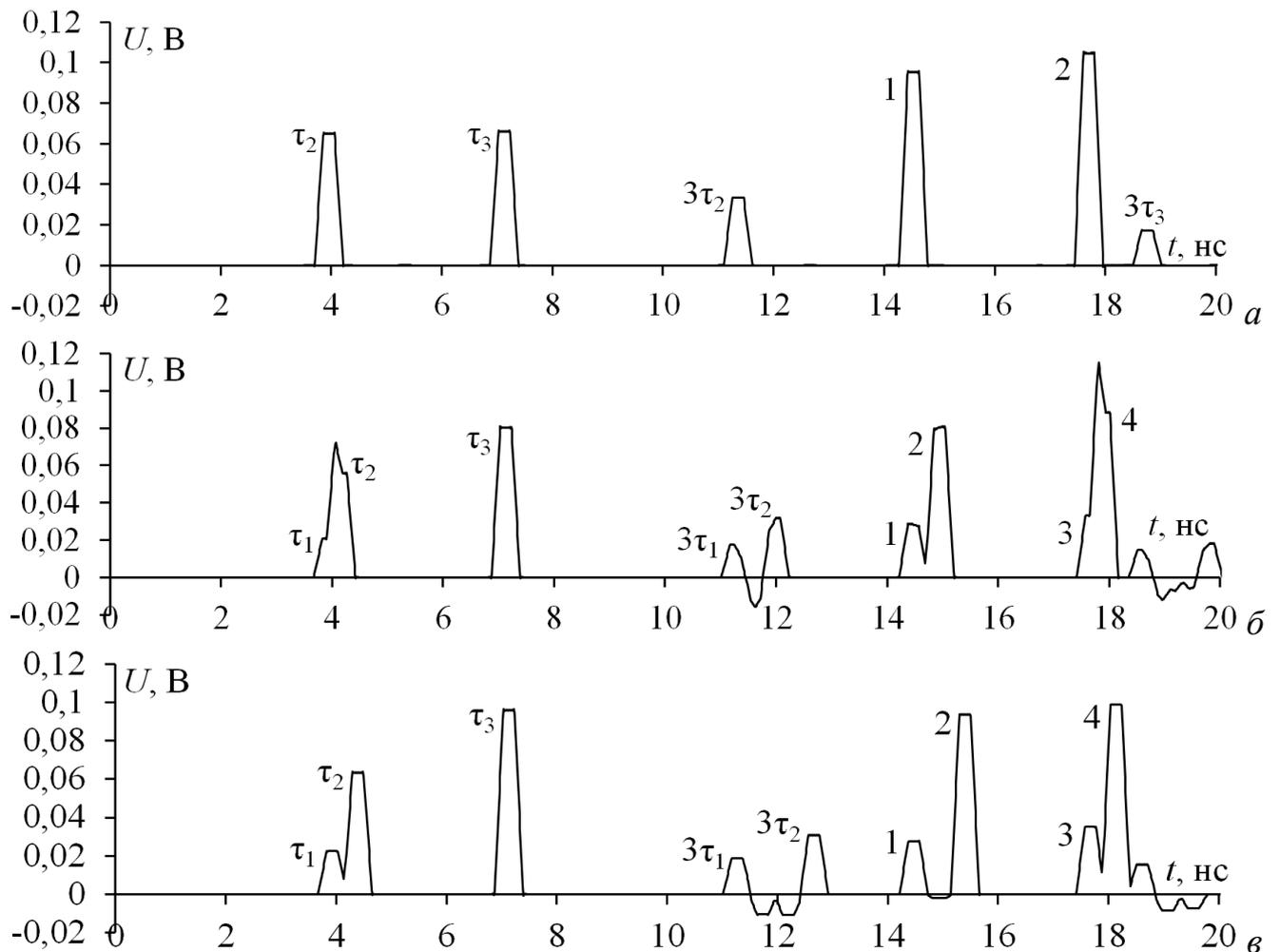


Рисунок 2.21 – Формы напряжения на выходе МФ в режиме ХХ-КЗ

при  $s_1=3,5$  (а), 1,1 (б), 0,5 (в) мм и  $l=1$  м

Так как ослабление СКИ на выходе МФ оценивается по максимальной из амплитуд, на рисунке 2.22 приведена зависимость амплитуды дополнительных импульсов 2 (рисунок 2.21а) и 4 (рисунок 2.21б, в) от  $s_1$ , обозначенной ( $U_{2(4)}$ ), которая является максимальной. Видно, что при  $s_1=0,9$  мм  $U_{2(4)}$  резко возрастает, что объясняется наложением импульсов со сложением амплитуд. Также наблюдается максимум в диапазоне  $s_1$  от 1,3 до 1,5 мм ( $U_{2(4)}=0,12$  В). Далее происходит монотонное убывание амплитуды при  $s_1$  от 1,7 ( $U_4=0,116$  В) до 3,5 мм ( $U_4=0,105$  В). Так, при  $s_1=0,7$  мм достигнута минимальная амплитуда 0,096 В. Наложение импульсов подтверждает рисунок 2.21, когда при  $s_1=3,5$  явно видно 2 импульса, а при  $s_1=1,1; 0,5$  мм их 4.

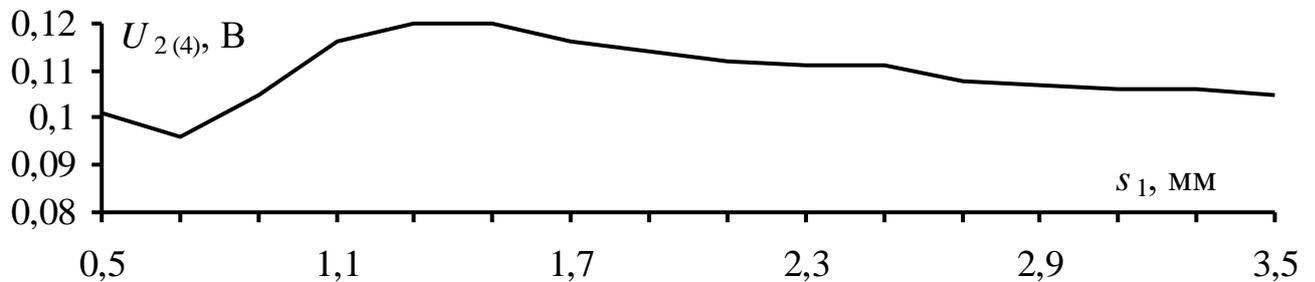


Рисунок 2.22 – Зависимость амплитуды  $U_{2(4)}$  от  $s_1$

В таблице 2.10 и 2.11 приведены получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов. Задержки дополнительных импульсов также определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии, а интервал между импульсами 3 и 4 в 2 раза больше, чем 5 и 6.

Таблица 2.10 – 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 2.11 – 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, можно сделать вывод, что увеличение асимметрии МФ за счет уменьшения  $s_1$  снижает максимальную из амплитуд до 10,4 раза по отношению к половине э.д.с.

## 2.4 Каскадное соединение двух модальных фильтров

Моделирование каскадного соединения двух МФ выполнялось по параметрам изготовленных макетов МФ (раздел 4.1.1), а именно  $t=35$  мкм,  $h=0,18$  мм,  $l=30$  см при  $w_1=w_2=w_3=1$  мм и  $s=0,5$  мм (для МФ1 – со слабой связью) и  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм и  $s=3,0$  мм (для МФ2 – с сильной связью).

На рисунке 2.23 приведена схема включения двух МФ с длиной каждого  $l$  и матрицами  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ . Принято  $R1=R2=R4=R6=R8=R9=50$  Ом, а для соединения крайних проводников –  $R3=R5=R7=R10=1$  мОм. Входное воздействие представляет собой трапециевидный импульс с параметрами: амплитуда э.д.с. – 2 В, время нарастания – 50 пс, плоской вершины – 100 пс, спада – 50 пс.

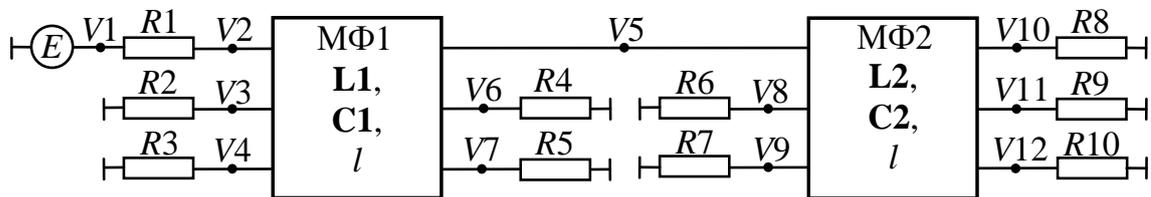


Рисунок 2.23 – Эквивалентная схема каскадного включения двух МФ

На рисунке 2.24 показаны результаты моделирования отклика. В узле  $V5$  (после МФ1) наблюдаются 2 импульса. Это объясняется тем, что 2 быстрые моды приходят примерно одновременно, образуя на выходе 1 импульс со сложением амплитуд, а медленная – позже. Из этого можно сделать вывод, что на выход МФ2 (узел  $V10$ ) придет 4 импульса. В таблице 2.12 приведены погонные задержки мод для МФ1 ( $\tau_{1i}$ ) и МФ2 ( $\tau_{2i}$ ), что позволяет рассчитать время прихода импульсов на выходе МФ2 как

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \tau_{11}l + \tau_{21}l = 2,28 \text{ нс}, & t_2 &= \tau_{11}l + \tau_{22}l = 2,30 \text{ нс}, & t_3 &= \tau_{11}l + \tau_{23}l = 3,24 \text{ нс}, \\
 t_4 &= \tau_{12}l + \tau_{21}l = 2,36 \text{ нс}, & t_5 &= \tau_{12}l + \tau_{22}l = 2,37 \text{ нс}, & t_6 &= \tau_{12}l + \tau_{23}l = 3,32 \text{ нс}, \\
 t_7 &= \tau_{13}l + \tau_{21}l = 3,08 \text{ нс}, & t_8 &= \tau_{13}l + \tau_{22}l = 3,09 \text{ нс}, & t_9 &= \tau_{13}l + \tau_{23}l = 4,04 \text{ нс}.
 \end{aligned}$$

Таблица 2.12 – Погонные задержки мод для МФ1 ( $\tau_{1i}$ ) и МФ2 ( $\tau_{2i}$ ) (нс/м)

МФ1			МФ2		
$\tau_{1_1}$	$\tau_{1_2}$	$\tau_{1_3}$	$\tau_{2_1}$	$\tau_{2_2}$	$\tau_{2_3}$
3,95	4,20	5,59	3,67	3,72	6,87

В узле V10 воздействующий импульс раскладывается на 4 импульса с попарно одинаковыми амплитудами ( $U_1$  (для  $t_5$ )=0,08 В,  $U_2$  (для  $t_8$ )=0,08 В,  $U_3$  (для  $t_6$ )=0,05 В,  $U_4$  (для  $t_9$ )=0,05 В). Однако  $t_8$  и  $t_6$  не наложились друг на друга из-за малой длительности воздействующего импульса.

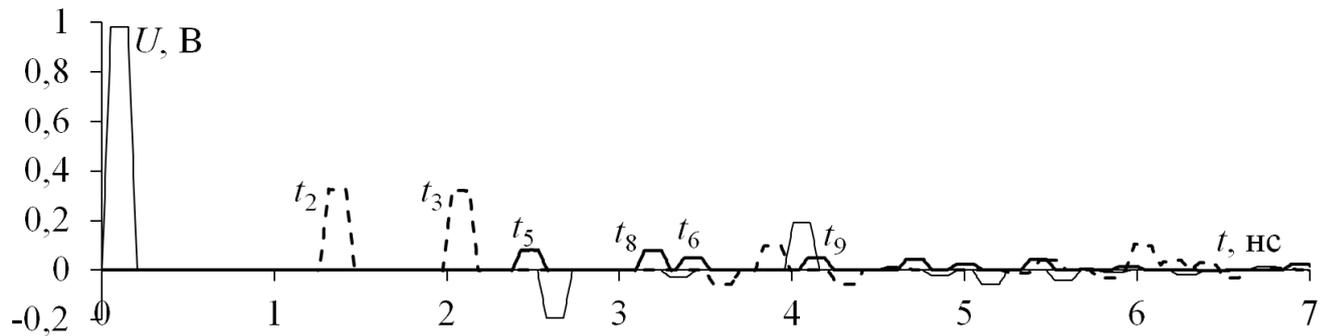


Рисунок 2.24 – Формы напряжения на входе МФ1 (—), выходе МФ1 (- -) и выходе МФ2 (-)

Рассмотрено безрезистивное подключение пассивных проводников. Каскадное соединение двух МФ позволяет рассмотреть больше вариантов такого подключения и достичь еще большего ослабления СКИ. Моделировалось влияние режимов включения «начало-конец» пассивного проводника: КЗ-ХХ и возможные комбинации. Комбинации и амплитуды импульсов разложения на выходе МФ2 приведены в таблице 2.13. Так как, с изменением граничных условий на концах пассивного проводника, появляются дополнительные импульсы с амплитудой большей, чем у основных импульсов мод, то ослабление будет оцениваться максимальной из амплитуд именно этих импульсов. Результаты моделирования форм напряжения на входе МФ1 и выходе МФ2 представлены на рисунках 2.25, 2.26. Максимальные амплитуды импульсов разложения при КЗ-ХХ, КЗ-ХХ и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ равны 0,037 В (рисунок 2.26а, з), так что максимальное уменьшение относительно половины воздействующей э.д.с. составило 19 раз.

Таблица 2.13 – Амплитуды импульсов на выходе МФ2

Граничные условия на концах пассивного проводника двух МФ	$U_5$ , В	$U_8$ , В	$U_6$ , В	$U_9$ , В	$U_{\max}$ , В
50-50, КЗ-ХХ	0,024	0,024	0,025	0,025	0,041
50-50, ХХ-КЗ	0,023	0,023	0,024	0,024	0,039
КЗ-ХХ, 50-50	0,052	0,059	0,032	0,037	0,059
ХХ-КЗ, 50-50	0,053	0,057	0,033	0,038	0,057
КЗ-ХХ, КЗ-ХХ	0,013	0,012	0,014	0,014	0,037
КЗ-ХХ, ХХ-КЗ	0,017	0,020	0,018	0,020	0,047
ХХ-КЗ, КЗ-ХХ	0,02	0,02	0,022	0,023	0,048
ХХ-КЗ, ХХ-КЗ	0,012	0,014	0,013	0,014	0,037

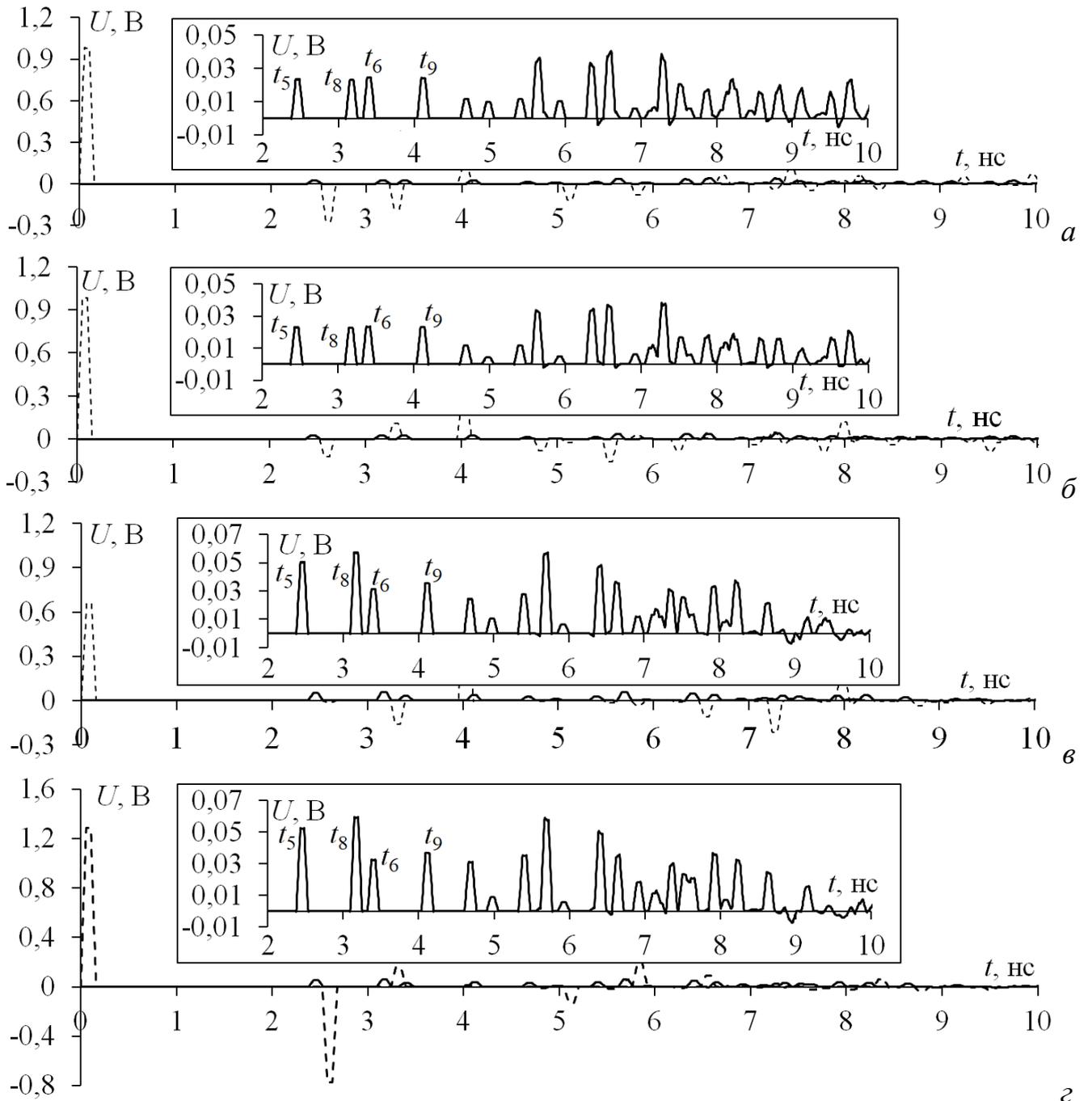


Рисунок 2.25 – Формы напряжения на входе МФ1 (- -) и выходе МФ2 (-) при 50-50, КЗ-ХХ (*a*), 50-50, ХХ-КЗ (*б*), КЗ-ХХ, 50-50 (*в*), ХХ-КЗ, 50-50 (*г*)

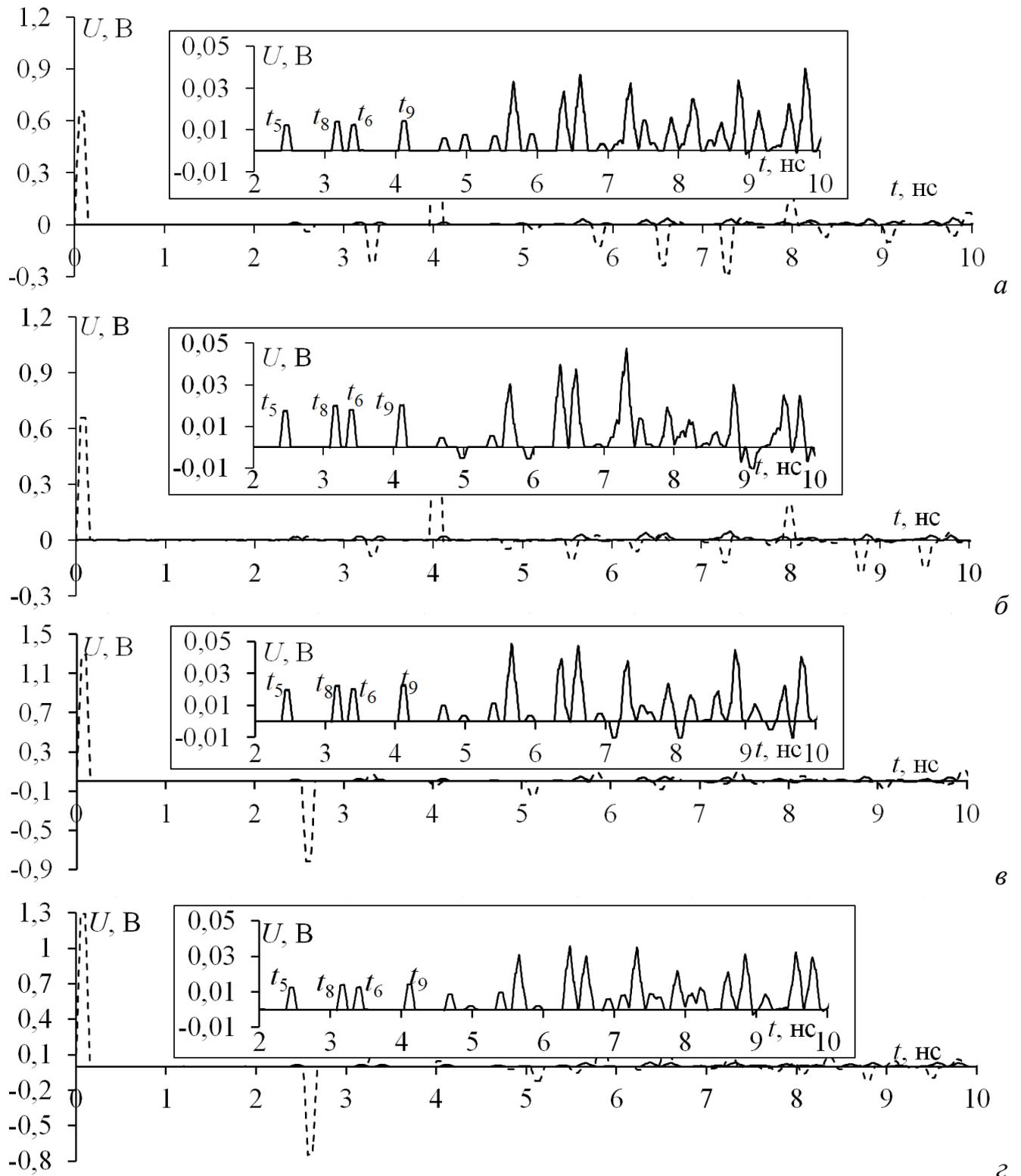


Рисунок 2.26 – Формы напряжения на входе МФ1 (- -) и выходе МФ2 (-) при КЗ-ХХ, КЗ-ХХ (*a*), КЗ-ХХ, ХХ-КЗ (*б*), ХХ-КЗ, КЗ-ХХ (*в*), ХХ-КЗ, ХХ-КЗ (*г*)

Таким образом, показана возможность разложения СКИ при каскадном соединении двух МФ одинаковой длины, с реализацией пассивного проводника между вырезами в опорной плоскости. Разложение достигнуто за счет увеличения

связи между проводниками МФ2, увеличившем разность задержек мод. Достигнуто ослабление в 19 раз.

## 2.5 Патенты на изобретения

Здесь представлены 2 полученных патента на изобретение [118, 119]. Техническим результатом в обоих является возможность защиты от СКИ за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды. Наиболее близкой к ним и взятой за прототип является микрополосковая линия передачи, состоящая из проводящей пластины, на которой параллельно ей расположена подложка, на которой параллельно ей расположен проводник прямоугольного поперечного сечения. Недостатком устройства-прототипа является отсутствие у него возможности защиты от СКИ.

*Модифицированная микрополосковая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов*

Предлагается устройство микрополосковой линии задержки для защиты от сверхкоротких импульсов, состоящее из проводящей пластины, на которой параллельно ей расположена подложка, на которой параллельно ей расположен проводник прямоугольного поперечного сечения, **отличающееся тем**, что в проводящей пластине выполнены два выреза, которые параллельны и равны по длине проводнику, в устройство добавлены два резистора, соединяющие концы проводника, образованного в проводящей пластине между двумя вырезами, с проводящей пластиной, при этом устройство выполнено таким образом, что значение длины линии, умноженное на значение разности максимальной погонной задержки мод линии и наибольшей из остальных не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада сверхкороткого импульса, подающегося между проводником и проводящей пластиной, а выбор параметров резисторов зависит от их поперечного сечения и расстояния между проводниками, а также относительной диэлектрической проницаемости, обеспечивающих минимизацию амплитуды сигнала на выходе.

На рисунке 2.27а приведена эквивалентная схема заявляемого устройства. Она состоит из трех параллельных проводников длиной  $l=1$  м каждый. Первый проводник линии на одном конце соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$  (в самом устройстве источника СКИ нет). На другом конце первый проводник линии соединен с нагрузкой, представленной сопротивлением  $R4$  (в самом устройстве нагрузки нет). Начало проводника, образованного в проводящей пластине между двумя вырезами, подключено к пластине (схемной земле) через резистор  $R2$ , а конец – через резистор  $R5$ .  $R3$  и  $R6$  – малые сопротивления перемычек между частями разрезанной пластины, т.е. в самом устройстве этих резисторов как компонентов нет, а при моделировании принято  $R3=R6=0,001$  Ом. Для остальных сопротивлений принято  $R1=R2=R4=R5=50$  Ом. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с параметрами: амплитуда – 2 В, нарастание – 150 пс, плоская вершина – 200 пс, спад – 150 пс.

На рисунке 2.27 б приведено поперечное сечение заявленного устройства. Параметры поперечного сечения:  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  и  $t$  – ширина и толщина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $s$  – расстояние между проводниками. Значения параметров:  $\epsilon_r=4,5$ ,  $w_1=w_2=2,1$  мм,  $w_3=0,5$  мм,  $s=3,5$  мм,  $h=0,18$  мм,  $t=35$  мкм.

Значения параметров поперечного сечения и длины линии обеспечивают минимальную амплитуду сигнала на выходе и выполнение условия

$$(\tau_2-\tau_1)l \geq t_r + t_d + t_f, \quad (2.2)$$

где  $\tau_2-\tau_1$  – разность максимальной погонной задержки мод линии и наибольшей из остальных,  $t_r$ ,  $t_d$  и  $t_f$  – длительности фронта, плоской вершины и спада импульса соответственно.

Для демонстрации достижения технического результата выполнено моделирование временного отклика на воздействие СКИ, показавшее близкие значения первых двух мод (3,65 нс/м и 3,71 нс/м) и более высокое значение третьей моды (6,78 нс/м), так что разность погонных задержек третьей и второй мод составляет 3,07 нс/м, а амплитуда импульсов является минимальной и

одинаковой (0,21 В). На рисунке 2.28 приведены формы напряжения в начале и конце линии. Таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлено заявленное устройство.

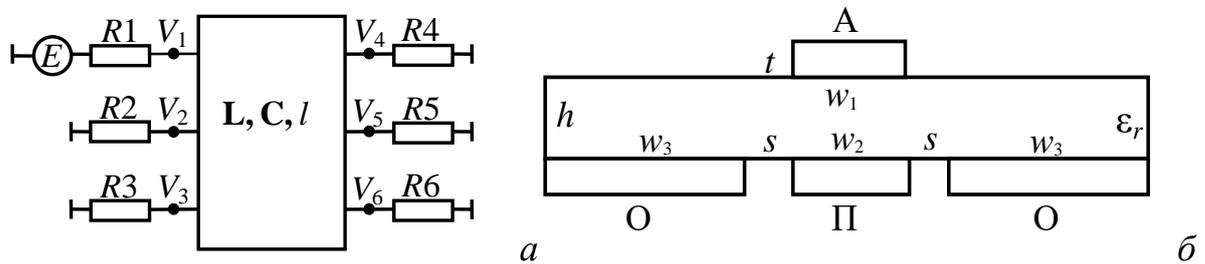


Рисунок 2.27 – Моделируемая схема (а) и поперечное сечение (б) заявленного устройства

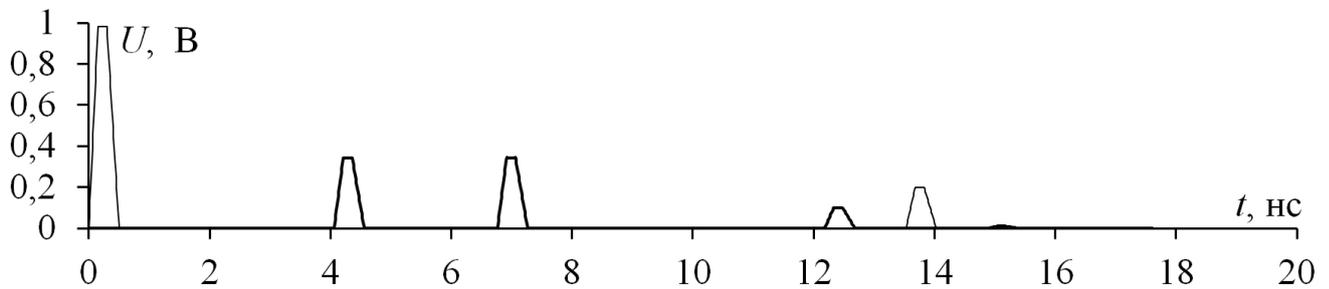


Рисунок 2.28 – Формы напряжения на входе (-) и выходе (-) МФ

*Модифицированная микрополосковая линия с улучшенной защитой от сверхкоротких импульсов*

Отличительной особенностью патента от ранее описанного, заключается в том, что один конец проводника, образованного в проводящей пластине между двумя вырезами, не соединен с ней, а другой соединен. Поскольку моделируемая схема, поперечное сечение и воздействие одинаковы для двух заявленных устройств, то здесь они не приводятся. Однако, приведем результаты моделирования, подтверждающие технический результат. Один конец проводника, образованного в проводящей пластине между двумя вырезами, не соединен с ней (режим ХХ – холостой ход), а другой соединен (режим КЗ – короткое замыкание), так что при моделировании принято  $R_2=10^5$  Ом в режиме ХХ или  $10^{-3}$  Ом в режиме КЗ и  $R_5=10^{-3}$  Ом или  $10^5$  Ом.  $R_3$  и  $R_6$  – малые сопротивления перемычек между частями разрезанной пластины, т.е. в самой линии этих резисторов как компонентов нет, а при моделировании принято  $R_3=R_6=0,001$  Ом.

Для демонстрации достижения технического результата выполнено моделирование временного отклика на воздействие СКИ при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. На рисунке 2.29 приведены формы сигналов в начале и конце линии. Амплитуды сигналов в конце линии при ХХ-КЗ и КЗ-ХХ одинаковы и равны 0,1 В. Таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлена заявленная линия.

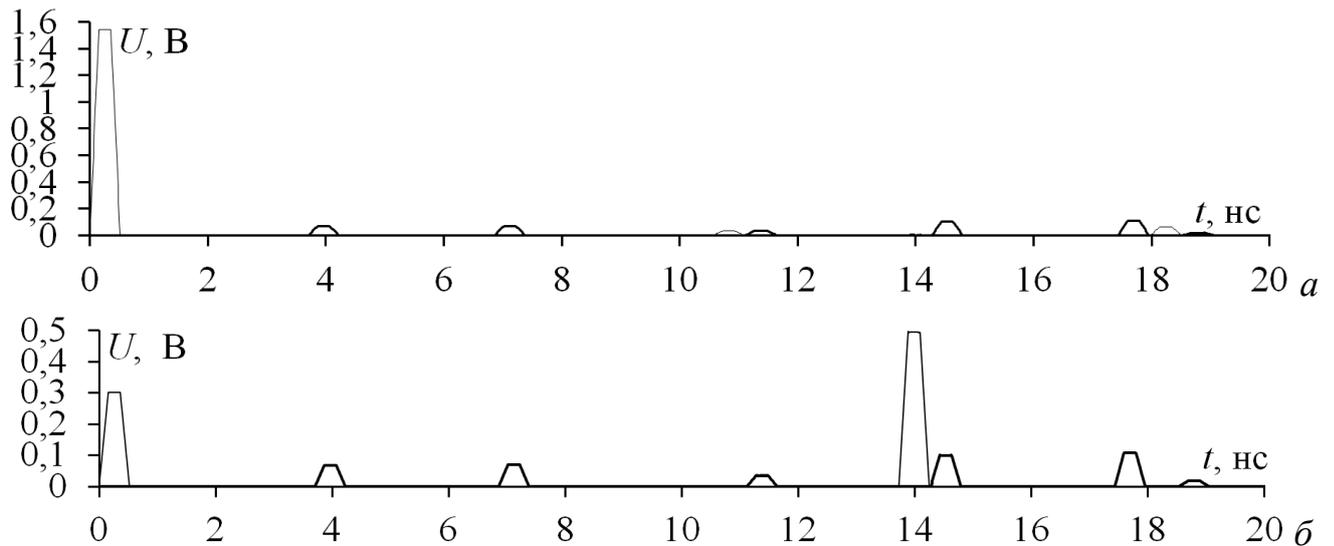


Рисунок 2.29 – Формы напряжения на входе (-) и выходе (-) заявленной линии, при режимах включения пассивного проводника ХХ-КЗ (а), КЗ-ХХ (б)

## 2.6 Основные результаты раздела

1. Представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости на разложение СКИ по двум основным критериям: увеличения разности погонных задержек мод и уменьшения амплитуды импульсов разложения за счет их выравнивания. Показано, что достичь выравнивания и минимизации амплитуды можно при изменении параметров поперечного сечения и сопротивлений на концах пассивного проводника. При изменении значений сопротивлений выявлено значение, обеспечивающее минимальную чувствительность амплитуды сигнала к изменению толщины подложки МФ.

2. Представлены результаты влияния асимметрии в поперечном сечении исследуемого МФ на погонные задержки и амплитуду импульсов разложения. Введение асимметрии за счет приближения одного опорного проводника к пассивному позволило разложить импульсы двух быстрых мод, которые при симметрии сливались. Разница их погонных задержек увеличилась (составила 0,46 нс/м), что позволило уменьшить 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.

3. Детально исследованы дополнительные импульсы во временном отклике. Выявлено, что они появляются с увеличением асимметрии поперечного сечения, а их задержки определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии. Показано, что при изменении граничных условий на концах пассивного проводника появляются дополнительные импульсы, амплитуда которых больше амплитуды основных импульсов мод. Увеличение асимметрии позволяет разложить импульсы с большей амплитудой на 4 импульса, уменьшив тем самым их амплитуду.

4. Показана возможность разложения СКИ при каскадном соединении двух МФ одинаковой длины. Разложение достигается за счет увеличения связи между активным и пассивным проводниками второго МФ, что позволяет увеличить разность задержек мод. Достигнуто уменьшение амплитуды на его выходе в 12,5 раза по отношению к половине э.д.с. при сопротивлениях 50 Ом на концах пассивных проводников. Рассмотрено влияние граничных условий на концах пассивных проводников двух МФ. При ХХ-КЗ, ХХ-КЗ достигнуто уменьшение амплитуды в 19 раз. Показано, что при изменении граничных условий ослабление определяется максимальной амплитудой дополнительных импульсов.

### **3. ОПТИМИЗАЦИЯ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ДВУХСТОРОННЕЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ**

Здесь, для МФ на ДПП, представлены результаты: влияния соединения опорных проводников (только на концах и вдоль всей длины) на разложение СКИ [120]; влияния количества опорных проводников на разложение СКИ при соединении опорных проводников только на концах [121 – 124]; улучшения характеристик посредством оптимизации параметров поперечного сечения для двух способов соединения опорных проводников, а также при отсутствии правого верхнего опорного проводника; влияния экрана на разложение СКИ [125–127]; влияния соединения опорных проводников на появление дополнительных импульсов; появления дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника в т.ч. в структурах без одного и двух опорных проводников [128, 129]. Кроме того, для МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями представлены результаты: улучшения характеристик посредством оптимизации по трем критериям; влияния удаления пассивных проводников на разложение СКИ [130]; улучшения характеристик посредством оптимизации при удалении правого нижнего пассивного проводника; анализа появления дополнительных импульсов, в т.ч. при удалении одного и двух пассивных проводников [131]. Также исследовано улучшение характеристик посредством оптимизации зеркально-симметричного МФ на ДПП и сравнены структуры МФ на ДПП с оптимальными параметрами поперечного сечения.

#### **3.1 Оптимизация модального фильтра на двухсторонней печатной плате эвристическим поиском**

Здесь представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения МФ на ДПП для двух способов соединения опорных проводников (только на концах и вдоль всей длины). Оптимизация выполнялась по двум основным

критериям: максимизация разности погонных задержек мод и минимизация амплитуд импульсов разложения исходного СКИ за счет их выравнивания.

### 3.1.1 Описание исследуемой структуры и предварительное моделирование

Данная структура может быть получена путем модификации опорного проводника широко используемой КПЛ. Как и в случае предыдущего МФ, два выреза в опорной плоскости способны обеспечить ослабление СКИ. Переход от КПЛ к МФ показан на рисунке 3.1.

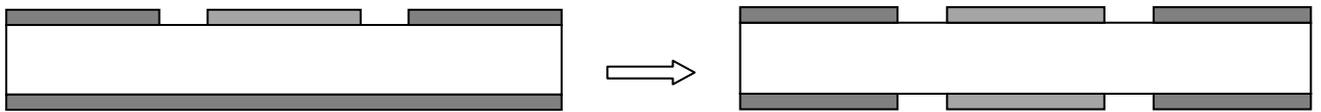


Рисунок 3.1 – Переход от КПЛ к МФ

Поперечное сечение и эквивалентные схемы включения исследуемого МФ приведены на рисунке 3.2. Параметры поперечного сечения:  $s$  – разнос проводников,  $w_1$  – ширина активного и пассивного проводников,  $w_2$  – ширина опорных проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $t$  – толщина проводников,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит.

Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . На другом конце активный проводник соединен с нагрузкой  $R3$ . Значения сопротивлений  $R1=R2=R3=R4=50$  Ом. В первом случае опорные проводники соединены лишь на концах и обозначаются на схеме (рисунок 3.2б) как отдельные проводники, закороченные на землю. Соединение опорных проводников на концах позволяет, рассматривать МФ с 5 проводниками в поперечном сечении (не считая одного опорного), а значит, в линии будет распространяться 5 мод. Во втором случае все опорные проводники соединены между собой вдоль всей длины, образуя единый опорный проводник, и на схеме не обозначаются (рисунок 3.2в). Соединение опорных проводников вдоль всей длины позволяет рассматривать только 2 проводника в поперечном сечении МФ (все

остальные образуют единый опорный проводник), а значит, в линии будет распространяться 2 моды. При моделировании на вход МФ подавался импульс амплитудой э.д.с. 2 В и общей длительностью 500 пс.

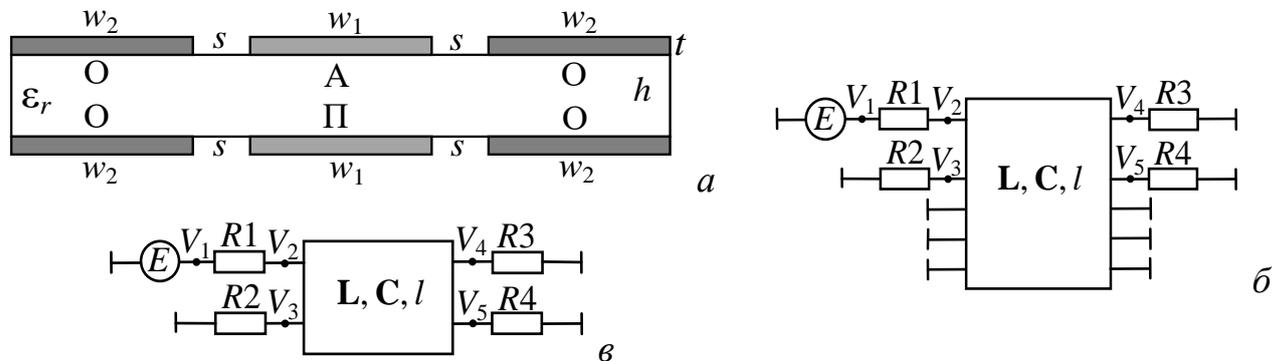


Рисунок 3.2 – Поперечное сечение (а) и эквивалентные схемы МФ с опорными проводниками, соединёнными только на концах (б) и вдоль всей длины (в)

Выполнено предварительное моделирование в диапазоне параметров для двух способов соединения опорных проводников. Моделирование для обоих случаев соединения выполнялось при одинаковых значениях параметров:  $s=0,5; 1; 1,5$  мм;  $w=0,5; 1; 1,5$  мм;  $h=0,5; 1; 1,5$  мм,  $t=18$  мкм,  $\epsilon_r=4,5$  при  $l=1$  м.

В таблицу 3.1 сведены значения погонных задержек ( $\tau_i$ ) и амплитуд импульсов на выходе МФ ( $U_i$ ) при всех значениях параметров. Для наглядного представления влияния параметров на разложение СКИ, на рисунке 3.3 приведены формы напряжения на входе и выходе МФ, при  $h=0,5; 1; 1,5$  мм,  $w=0,5; 1,5$  мм и  $s=0,5; 1,5$  мм. Из рисунка 3.3 видно, что к выходу МФ приходят 3 импульса (несмотря на 5 распространяющихся мод в линии). Это объясняется малой амплитудой импульса 1 (так что на отклике его не видно) и близкими значениями  $\tau_3$  и  $\tau_4$ , что означает одновременный приход импульсов 3 и 4 к концу проводника, а следовательно, их наложение.

С увеличением  $h$  значение  $\tau_2$  становится больше, а  $\tau_3$  и  $\tau_5$  – меньше. За счет этого уменьшается разность погонных задержек мод. Так, при  $h=1,5$  мм ( $w=0,5$  мм и  $s=0,5$  мм)  $\tau_3-\tau_2=0,06$  нс/м и  $\tau_5-\tau_2=0,58$  нс/м. Разность погонных задержек 0,06 нс/м приводит к наложению импульсов и соответственному увеличению амплитуды до 0,59 В (рисунок 3.3д). То же самое видно и при  $h=1$  мм (амплитуда

на выходе МФ составляет 0,69 В, рисунок 3.3в). Увеличение значений  $w$  и  $s$  позволяет увеличить разность погонных задержек мод: например, для мод 5 и 2, от 1,2 до 2,06 нс/м при  $h=0,5$  мм, от 0,71 до 1,5 нс/м при  $h=1$  мм и от 0,64 до 1,18 нс/м при  $h=1,5$  мм. С увеличением  $\Delta t$  максимальная из амплитуд импульсов становится меньше: 0,37 В (при  $h=1$  мм,  $w=1,5$  мм и  $s=1,5$  мм) и 0,39 В (при  $h=1,5$  мм,  $w=1,5$  мм и  $s=1,5$  мм). Значения амплитуд разложенных импульсов также зависят от параметров  $h$ ,  $s$  и  $w$ .

Таблица 3.1 – Вычисленные значения характеристик МФ с опорными проводниками, соединенными только на концах

$h$ , мм	$w$ , мм	$s$ , мм	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$\tau_3$ , нс/м	$\tau_4$ , нс/м	$\tau_5$ , нс/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_4$ , В	$U_5$ , В
0,5	0,5	0,5	4,30	4,83	5,49	5,54	6,03	-	0,40	0,15		0,35
		1	4,09	4,60	5,57	5,57	5,95	-	0,33	0,56		0,43
		1,5	3,96	4,45	5,58	5,59	5,93	-	0,29	0,03		0,47
	1	0,5	4,22	4,68	5,78	5,88	6,27	-	0,42	0,18		0,29
		1	4,01	4,45	5,87	5,91	6,19	-	0,35		0,39	
		1,5	3,89	4,31	5,91	5,91	6,15	-	0,31		0,45	
	1,5	0,5	4,18	4,59	5,95	6,06	6,39	-	0,43	0,178		0,25
		1	3,97	4,37	6,04	6,08	6,32	-	0,37		0,36	
		1,5	3,86	4,23	6,08	6,09	6,29	-	0,32		0,42	
1	0,5	0,5	4,63	5,13	5,19	5,19	5,84	-		0,60		0,323
		1	4,42	4,99	5,25	5,25	5,83	-		0,43		0,389
		1,5	4,28	4,86	5,28	4,28	5,81	-	0,34	0,05		0,43
	1	0,5	4,52	5,02	5,42	5,51	6,08	-	0,45	0,21		0,28
		1	4,32	4,86	5,51	5,56	6,05	-	0,40	0,14		0,35
		1,5	4,19	4,73	5,56	5,59	6,00	-	0,36	0,09		0,40
	1,5	0,5	4,46	4,93	5,58	5,71	6,23	-	0,46	0,23		0,26
		1	4,27	4,77	5,68	5,76	6,18	-	0,41	0,17		0,32
		1,5	4,14	4,64	5,74	5,78	6,14	-	0,37	0,12		0,36
1,5	0,5	0,5	4,81	5,04	5,10	5,20	5,68	-		0,59		0,32
		1	4,63	5,09	5,11	5,14	5,75	-		0,50		0,37
		1,5	4,49	5,05	5,12	5,13	5,75	-		0,43		0,40
	1	0,5	4,69	5,16	5,27	5,30	5,93	-		0,69		0,27
		1	4,52	5,06	5,32	5,36	5,95	-		0,512		0,34
		1,5	4,39	4,96	5,37	5,39	5,93	-	0,38	0,11		0,38
	1,5	0,5	4,62	5,10	5,39	5,49	6,08	-		0,56		0,25
		1	4,45	4,98	5,47	5,56	6,08	-	0,43	0,18		0,31
		1,5	4,33	4,87	5,52	5,57	6,05	-	0,39	0,14		0,35

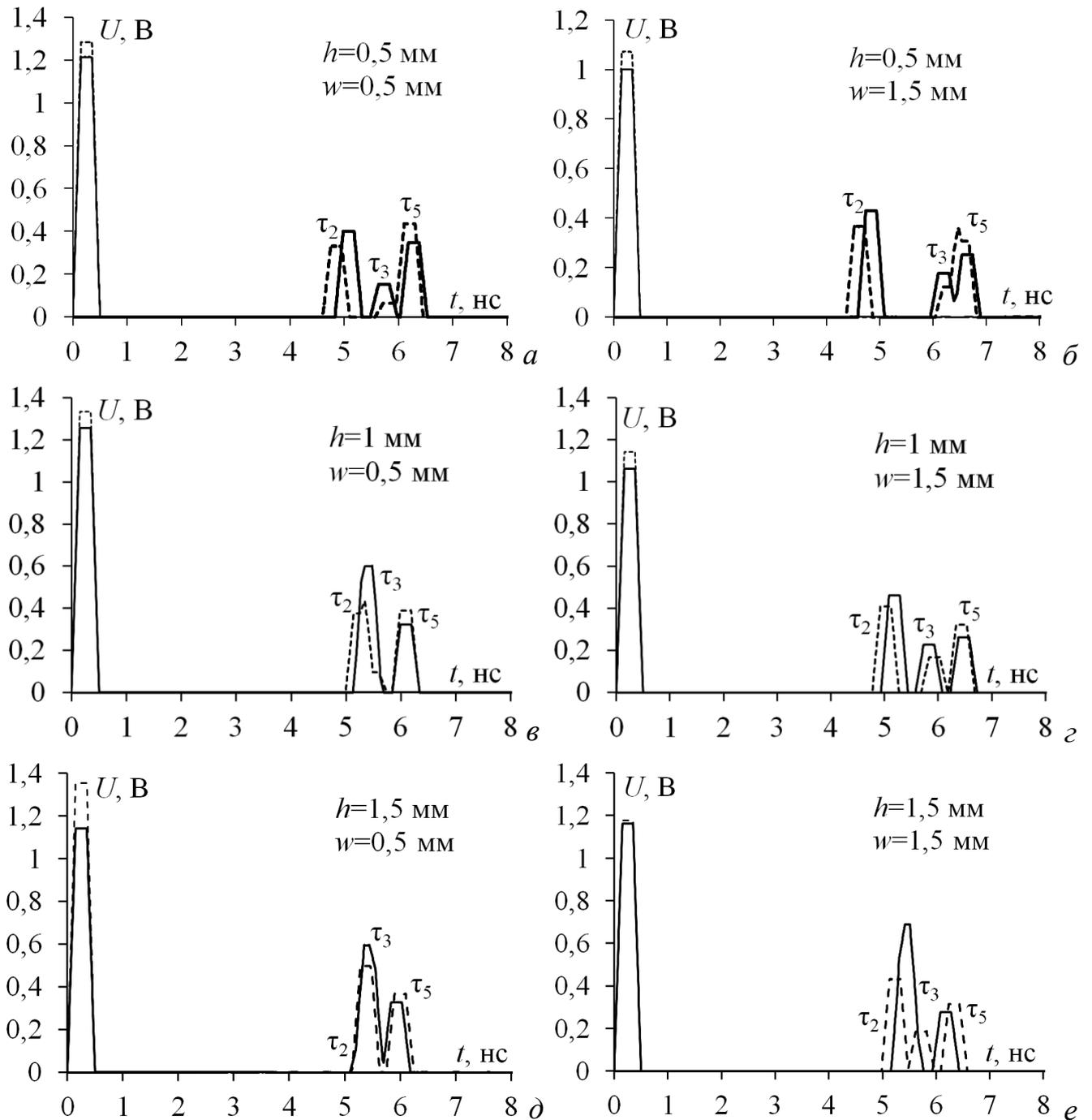


Рисунок 3.3 – Формы напряжения на входе МФ с опорными проводниками, соединенными только на концах при  $s=0,5$  (—), 1 (---) мм

и выходе МФ при  $s=0,5$  (—), 1 (---) мм для  $h=0,5$  мм при  $w_2=0,5$  (а), 2 (б) мм, для  $h=1$  мм при  $w_2=0,5$  (в), 2 (г) мм и  $h=1,5$  мм при  $w_2=0,5$  (д), 2 (е) мм

В таблицу 3.2 сведены значения погонных задержек ( $\tau_i$ ) и амплитуды импульсов на выходе МФ ( $U_i$ ) для соединения опорных проводников вдоль всей длины. На рисунке 3.4 для этого случая приведены формы напряжения на входе и

выходе МФ, при  $h=0,5; 1; 1,5$  мм,  $w=0,5; 1,5$  мм и  $s=0,5; 1,5$  мм. Видно, что к выходу МФ при всех значениях параметров приходят только 2 импульса.

С уменьшением  $h$  и увеличением  $s$  и  $w$  разность погонных задержек мод увеличивается. В большей степени на увеличение  $\Delta\tau$  влияет  $h$  и  $w$  и незначительно –  $s$ . Однако увеличение  $s$  при  $h=1,5$  мм (рисунок 3.4д) позволило увеличить  $\Delta\tau$ , тем самым уменьшив максимальную из амплитуд. При  $h=0,5$  мм,  $s=0,5$  мм и  $w=1,5$  мм амплитуды импульсов на выходе МФ выравниваются до 0,43 В. Максимальное значение  $\Delta\tau$  2,02 нс/м достигнуто при  $h=0,5$  мм,  $w=1,5$  мм и  $s=1,5$  мм.

Таблица 3.2 – Вычисленные значения характеристик МФ с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины

$h$ , мм	$w$ , мм	$s$ , мм	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В
0,5	0,5	0,5	4,83	5,86	0,40	0,49
		1	4,60	5,90	0,33	0,50
		1,5	4,44	5,91	0,29	0,49
	1	0,5	4,68	6,08	0,42	0,47
		1	4,68	6,08	0,42	0,47
		1,5	4,31	6,13	0,31	0,47
	1,5	0,5	4,59	6,21	0,43	0,43
		1	4,37	6,24	0,36	0,43
		1,5	4,23	6,25	0,32	0,43
1	0,5	0,5	5,13	5,61	0,43	0,49
		1	4,99	5,71	0,37	0,49
		1,5	4,86	5,75	0,33	0,48
	1	0,5	5,02	5,79	0,45	0,50
		1	4,86	5,89	0,40	0,50
		1,5	4,73	5,92	0,36	0,50
	1,5	0,5	4,94	5,92	0,46	0,49
		1	4,77	6,00	0,41	0,49
		1,5	4,64	6,04	0,37	0,49
1,5	0,5	0,5	5,20	5,49	0,67	
		1	5,14	5,60	0,39	0,47
		1,5	5,05	5,65	0,36	0,47
	1	0,5	5,16	5,62	0,46	0,50
		1	5,06	5,74	0,42	0,49
		1,5	4,96	5,79	0,38	0,49
	1,5	0,5	5,09	5,74	0,47	0,50
		1	4,98	5,85	0,43	0,50
		1,5	4,87	5,90	0,39	0,50

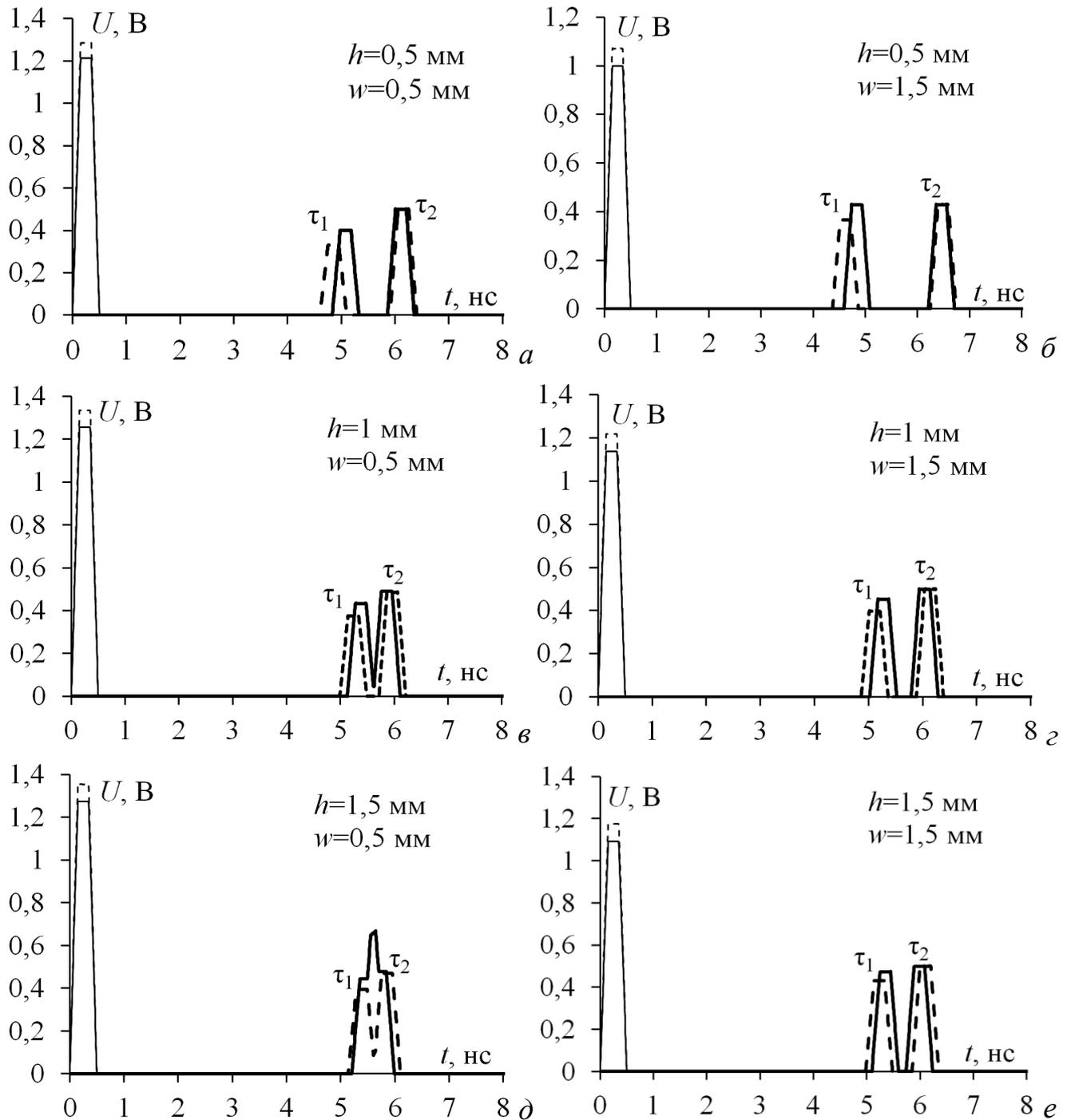


Рисунок 3.4 – Формы напряжения на входе МФ с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины при  $s=0,5$  (—),  $1$  (---) мм

и выходе МФ при  $s=0,5$  (—),  $1$  (---) мм для  $h=0,5$  мм при  $w_2=0,5$  (а),  $2$  (б) мм, для  $h=1$  мм при  $w_2=0,5$  (в),  $2$  (г) мм и  $h=1,5$  мм при  $w_2=0,5$  (д),  $2$  (е) мм

Сравнение результатов соединения опорных проводников двумя способами показало, что  $\Delta t$  больше в случае соединения опорных проводников на конце, при всех значениях параметров. Так, при  $h=0,5$  мм,  $s=0,5$  мм и  $w=0,5$  мм это  $1,2$  и  $1,03$  нс/м. Разложение входного воздействия на 3 импульса, позволяет достичь

большого ослабления СКИ. Так, из таблицы 3.1 следует, что минимальное значение максимального напряжения импульсов достигается при  $h=1$  мм,  $w=1,5$  мм и  $s=1,5$  мм и составляет 0,37 В, а ослабление по отношению к половине э.д.с. равно 3,2 раза. По таблице 3.2 данное значение достигается при  $h=0,5$  мм,  $w=1,5$  мм и  $s=1,5$  мм и составляет 0,43 В, а ослабление по отношению к половине э.д.с. равно 2,3 раза.

Таким образом, показано влияние соединения опорных проводников и параметров поперечного сечения на разложение СКИ в МФ на ДПП. Для двух способов соединения опорных проводников  $\Delta t$  возрастает с уменьшением  $h$  и увеличением  $w$  и  $s$ , за счет чего возрастает ослабление МФ. Выявлено, что разность погонных задержек мод на 20% больше в случае соединения опорных проводников на конце, при всех значениях параметров. Показано что, в случае соединения опорных проводников на конце, к выходу МФ приходят 3 импульса (несмотря на 5 распространяющихся мод в линии) и 2 импульса в случае соединения опорных проводников вдоль всей длины. Разложение входного воздействия на 3 импульса позволяет достичь большего ослабления СКИ: 3,2 раза (по отношению к половине э.д.с.) против 2,3 раза при соединении опорных проводников вдоль всей длины.

В заключение отметим достоинства каждого из способов соединения опорных проводников. Соединение опорных проводников только на концах, за счет большего количества мод на выходе МФ, позволяет достичь большего ослабления и распределения энергии СКИ по времени. Соединение опорных проводников вдоль всей длины МФ позволит их реализовывать не только как отдельные защитные устройства, но и интегрировать их в ДПП. Это может дать дополнительные преимущества: использовать полигона земли, не занимая дополнительную площадь устройствами защиты.

### 3.1.2 Оптимизация модального фильтра с опорными проводниками, соединенными только на концах

Здесь представлены результаты исследования и оптимизации МФ с опорными проводниками, соединенными только на концах.

#### 3.1.2.1 Влияние количества опорных проводников на разложение импульса

В подразделе 3.1.1 показано, что в случае соединения опорных проводников только на концах к выходу МФ приходят три импульса. Поэтому выполнено более детальное моделирование влияния опорных проводников на разложение СКИ, в частности их количества, поскольку удаление одного или двух опорных проводников позволяет уменьшить массу МФ.

Поперечные сечения и эквивалентная схема МФ без одного опорного проводника показаны на рисунке 3.5. Моделирование выполнялось для всех МФ (с удалением одного и двух опорных проводников) при одинаковых параметрах  $s=0,5$  мм,  $w=1,5$  мм,  $h=1$  мм и  $t=18$  мкм. Такой набор параметров обусловлен тем, что к выходу МФ приходят все моды, которые распространяются в линии. Формы напряжений на входе и выходе МФ показаны на рисунках 3.6 и 3.7.

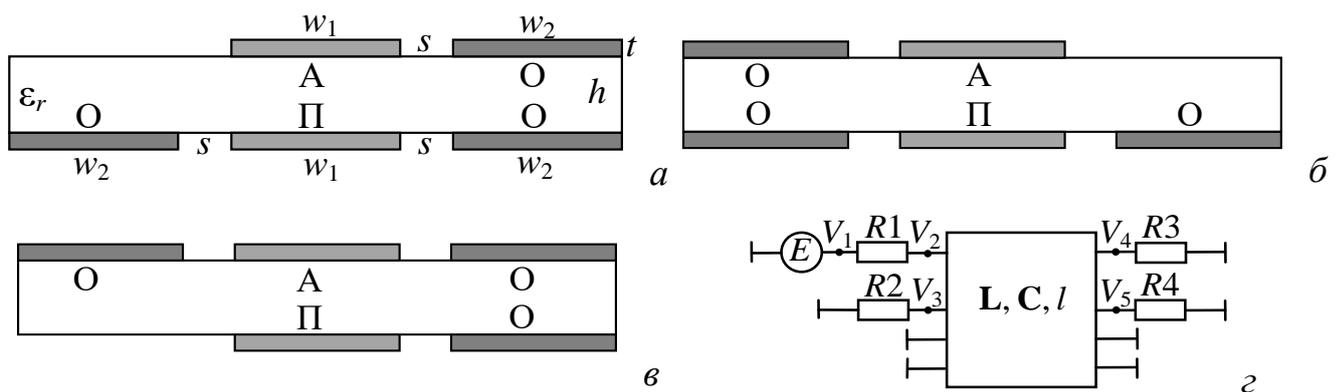


Рисунок 3.5 – Поперечное сечение МФ без левого верхнего (а), правого верхнего (б), левого нижнего (в) опорных проводников и эквивалентная схема МФ (г)

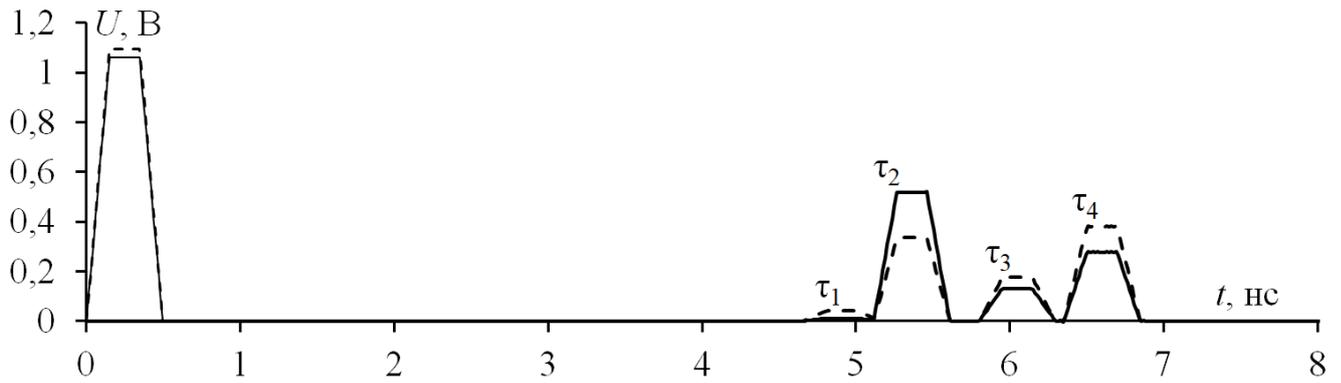


Рисунок 3.6 – Формы напряжения

на входе МФ без нижнего (-) и верхнего (- -) левых опорных проводников  
и выходе МФ без нижнего (-) и верхнего (- -) левых опорных проводников

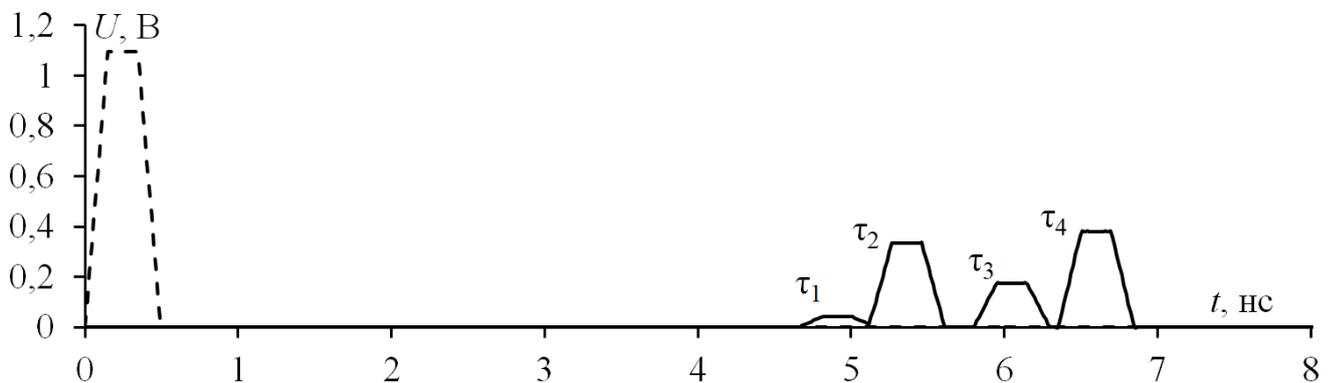


Рисунок 3.7 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

без правого верхнего опорного проводника

Из представленных результатов видно, что удаление одного опорного проводника не влияет на погонные задержки мод, а влияет на амплитуду импульсов. Удаление левого нижнего проводника приводит к возрастанию амплитуд импульсов 2 и 4 и уменьшению амплитуды импульса 3. Также, можно наблюдать одинаковые результаты с удалением верхнего опорного проводника. Полученные значения погонных задержек и амплитуд импульсов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды ( $U_i$ , В) для МФ без одного опорного проводника

МФ без проводника	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
Левого верхнего	4,659	5,116	5,801	6,352	0,043	0,335	0,175	0,383
Левого нижнего	4,659	5,116	5,801	6,352	0,011	0,518	0,130	0,279
Правого верхнего	4,660	5,116	5,801	6,352	0,043	0,335	0,175	0,383

Поперечные сечения и эквивалентная схема МФ без двух опорных проводников показаны на рисунке 3.8, а формы напряжения на входе и выходе приведены на рисунке 3.9. Видно, что удаление боковых проводников влияет только на амплитуду импульсов: у первого она стала больше, а у двух других – меньше. При удалении диагональных проводников разность погонных задержек мод становится меньше, а амплитуда импульсов больше. Также, видно отсутствие импульса 3. Полученные значения погонных задержек мод и амплитуд импульсов приведены в таблице 3.4.

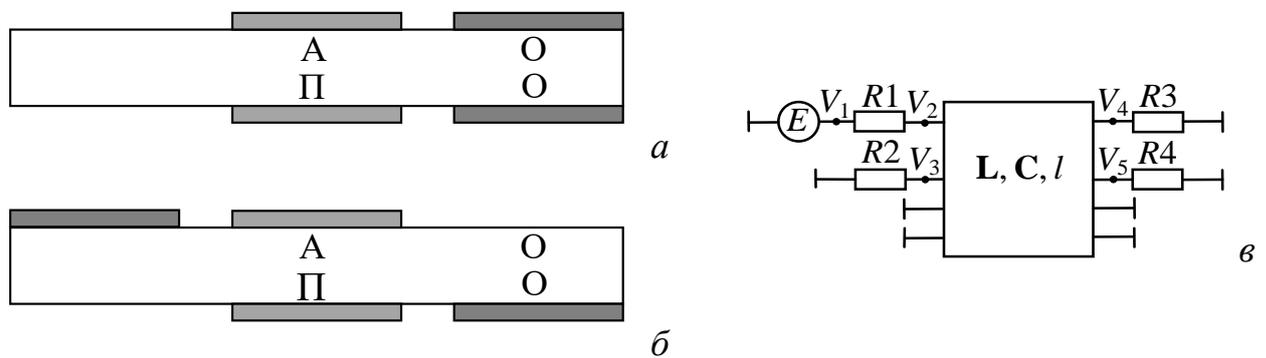


Рисунок 3.8 – Поперечное сечение МФ без двух боковых (а) и диагональных (б) опорных проводников и эквивалентная схема МФ (в)

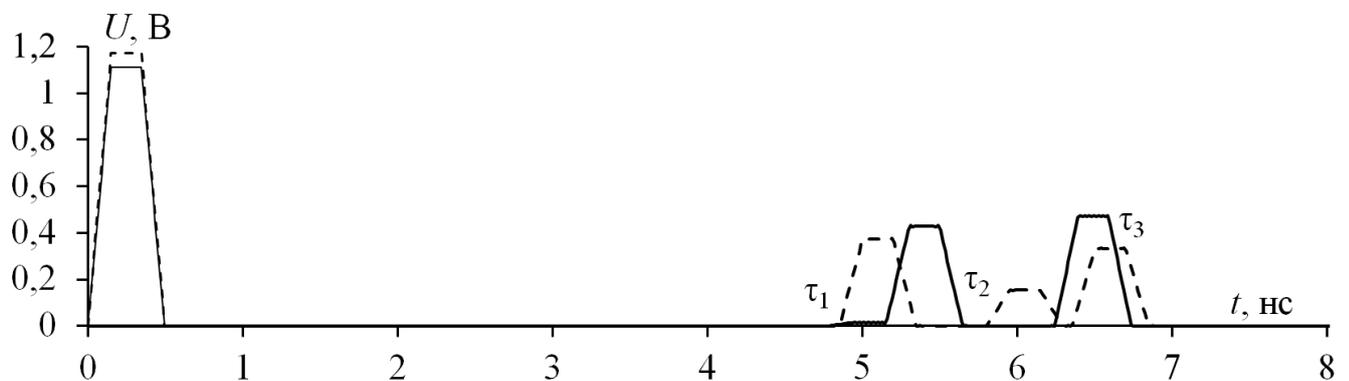


Рисунок 3.9 – Формы напряжения

на входе МФ без диагональных (—) и боковых (---) опорных проводников  
и выходе МФ без диагональных (-) и боковых (- -) опорных проводников

Таблица 3.4 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды ( $U_i$ , В) для МФ без двух опорных проводников

МФ без проводников	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
Боковых	4,851	5,801	6,353	0,373	0,155	0,333
Диагональных	4,784	5,152	6,242	0,015	0,429	0,472

В некоторой степени можно оценить влияние опорных проводников на появление импульсов. Так, на появление и амплитуду первого импульса больше всего влияет левый опорный проводник. Когда нет левого нижнего проводника, амплитуда импульса 1 стала меньше и составляет 0,011 В, а при его наличии – 0,335 В. Когда отсутствуют два боковых проводника, его нет вовсе. На появление импульса 3 влияет нижний и один из верхних опорных проводников.

### 3.1.2.2 Патент и заявка на изобретение

Здесь представлен полученный патент [132] и 1 заявка на изобретение. Технический результат состоит в уменьшении массы печатной платы, не уменьшая подавления СКИ. Он достигается за счет отсутствия одного и двух опорных проводников и выбора параметров устройства. Наиболее близким к заявленным устройствам является выбранный за прототип способ резервирования для печатных плат, включающий компоновку и трассировку резервируемой и резервной цепей. Недостатками данного способа являются большая масса и недостаточное ослабление СКИ.

*Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием*

Предлагается способ трассировки ДПП, защищающий от СКИ, включающий компоновку и трассировку резервируемой и резервной цепей, так что компоновка и трассировка резервируемой цепи выполняются на верхнем слое подложки, а компоновка и трассировка резервной цепи выполняются на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою, так что резервируемый и резервный проводники располагаются друг под другом, **отличающийся тем, что** на верхнем слое подложки опорный проводник выполняется слева от резервируемого проводника, а на нижнем слое подложки опорные проводники выполняются слева и справа от резервного проводника, при этом значение длины линии, умноженное на значение разности максимальной погонной задержки и наибольшей из остальных погонных задержек четырех импульсов разложения сверхкороткого импульса, не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада

сверхкороткого импульса, подающегося между проводником резервируемой цепи на верхнем слое подложки и любым опорным проводником.

На рисунке 3.10а приведена эквивалентная схема, моделируемая для подтверждения реализуемости заявки. Она состоит из четырех параллельных проводников длиной  $l=1$  м каждый. Первый проводник линии на одном конце соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . На другом конце первый проводник линии соединен с нагрузкой, представленной сопротивлением  $R3$ . Начало сигнального проводника, на нижнем слое подложки, подключено к пластине (схемной земле) через резистор  $R2$ , а конец – через резистор  $R4$ . Два крайних левых проводника являются опорными и напрямую подключены с обоих концов к схемной земле. Значения сопротивлений  $R1=R2=R3=R4=50$  Ом. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с параметрами: амплитуда – 2 В, нарастание – 150 пс, плоская вершина – 200 пс, спад – 150 пс.

На рисунке 3.10б приведено поперечное сечение моделируемой структуры. Параметры поперечного сечения:  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $w_1, w_2, w_3, w_4$  и  $t$  – ширина и толщина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $s$  – расстояние между проводниками. Значения параметров:  $\epsilon_r=4,5$ ,  $w_1=w_2=w_3=w_4=1000$  мкм,  $s=300$  мкм,  $h=500$  мкм,  $t=105$  мкм.

Значения параметров поперечного сечения и длины линии обеспечивают минимизацию амплитуды сигнала на выходе и выполнение условия

$$(\tau_4 - \tau_3)l \geq t_r + t_d + t_f, \quad (3.1)$$

где  $\tau_4 - \tau_3$  – разность максимальной погонной задержки мод линии и наибольшей из остальных,  $t_r$ ,  $t_d$  и  $t_f$  – длительности фронта, плоской вершины и спада импульса соответственно.

Импульсная помеха подавалась между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником, функцию резервной трассы выполняет пассивный проводник. Результат моделирования во временной области представлен на рисунке 3.10в. На выходе структуры (узел V4) наблюдаются 4 импульса разложения с погонными задержками:  $\tau_1=4,398$  нс/м,  $\tau_2=4,750$  нс/м,

$\tau_3=5,736$  нс/м и  $\tau_4=6,359$  нс/м. Значение максимального напряжения на выходе структуры составляет 0,33 В, тогда как для прототипа оно составляет 0,5 В. Разложение импульсной помехи на последовательность импульсов меньшей амплитуды обусловлено разностью задержек погонных мод в структуре, образованной данным способом компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием. В случае подачи импульсной помехи между пассивным проводником и любым опорным проводником значение максимального напряжения на выходе структуры составляет 0,45 В (рисунок 3.10 $\epsilon$ ). Отсутствие одного проводника уменьшает массу, таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлен заявленный способ.

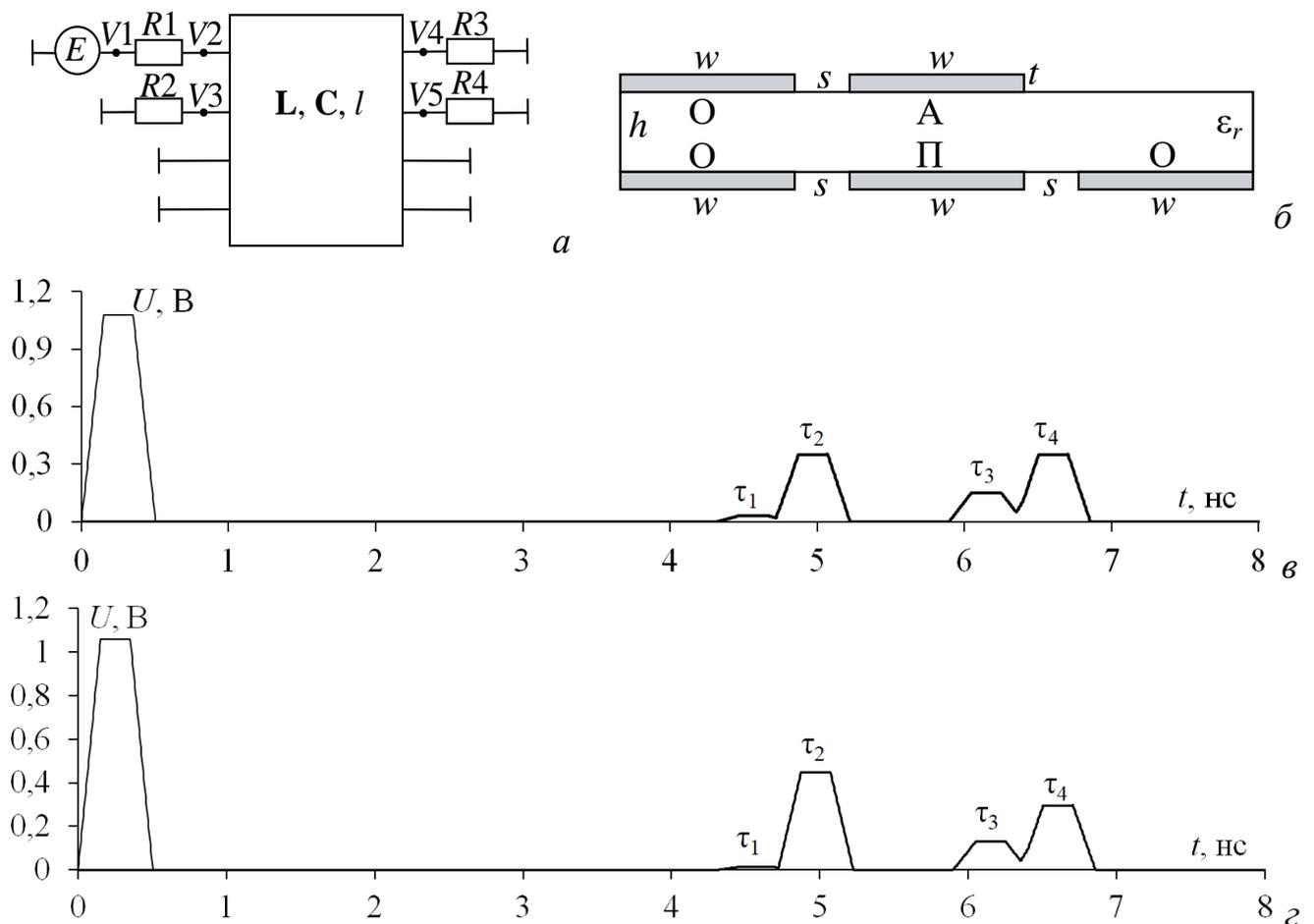


Рисунок 3.10 – Эквивалентная схема (а), поперечное сечение (б) и формы напряжений на входе (–) и выходе (–) при подаче СКИ на активный (е) и пассивный (з) проводники структуры, реализующей заявленный способ резервирования

*Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием и уменьшенным количеством проводников*

Предлагается способ трассировки ДПП, защищающий от сверхкоротких импульсов, включающий компоновку и трассировку резервируемой и резервной цепей, так что компоновка и трассировка резервируемой цепи выполняются на верхнем слое подложки, а компоновка и трассировка резервной цепи выполняются на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою, так что резервируемый и резервный проводники располагаются друг под другом, **отличающийся тем, что** на верхнем слое подложки опорный проводник выполняется слева от резервируемого проводника, а на нижнем слое подложки опорный проводник выполняется справа от резервного проводника, при этом значение длины линии, умноженное на значение разности максимальной погонной задержки и наибольшей из остальных погонных задержек, не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада сверхкороткого импульса, подающегося между резервируемым и опорным проводниками.

Технический результат состоит в уменьшении массы печатной платы, не уменьшая подавления СКИ. Достигается он за счет наличия лишь двух опорных проводников и выбора параметров платы.

На рисунке 3.11а приведена эквивалентная схема, моделируемая для подтверждения реализуемости способа. Она состоит из трех проводников (четвертый проводник, один из опорных – это схемная земля) длиной  $l=1$  м каждый. Первый (резервируемый) проводник линии на одном конце соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ , а на другом – с нагрузкой, представленной сопротивлением  $R3$ . Начало второго (резервного) проводника подключено к схемной земле через резистор  $R2$ , а конец –  $R4$ . Второй опорный проводник соединен с обоих концов со схемной землей, а  $R1=R2=R3=R4=50$  Ом. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с параметрами: амплитуда – 2 В, нарастание – 150 пс, плоская вершина – 200 пс, спад – 150 пс.

На рисунке 3.11б приведено поперечное сечение моделируемой структуры. Параметры поперечного сечения:  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $w$  и  $t$  – ширина и толщина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $s$  – расстояние между проводниками. Значения параметров:  $\epsilon_r=4,5$ ,  $w=1500$  мкм,  $s=500$  мкм,  $h=500$  мкм,  $t=35$  мкм.

Значения параметров поперечного сечения и длины линии обеспечивают минимизацию амплитуды сигнала на выходе и выполнение условия

$$(\tau_3 - \tau_2)l \geq t_r + t_d + t_f, \quad (3.2)$$

где  $\tau_3 - \tau_2$  – разность максимальной погонной задержки мод линии и наибольшей из остальных,  $t_r$ ,  $t_d$  и  $t_f$  – длительности фронта, плоской вершины и спада импульса соответственно.

Импульсная помеха подавалась между резервируемым (активным) и опорным проводниками, а резервный проводник остается пассивным. Результаты моделирования временного отклика представлены на рисунке 3.11в. На выходе структуры (узел V4) наблюдаются 2 импульса разложения, соответствующие погонным задержкам  $\tau_2=4,733$  нс/м,  $\tau_3=6,433$  нс/м и один импульс малой амплитуды, соответствующий погонной задержке  $\tau_1=4,403$  нс/м. Значение максимального напряжения на выходе структуры составляет 0,42 В, тогда как для прототипа оно составляет 0,5 В. Разложение импульсной помехи на последовательность импульсов меньшей амплитуды обусловлено разностью задержек погонных мод в структуре. В случае подачи импульсной помехи между пассивным проводником и любым опорным проводником значение максимального напряжения на выходе структуры составляет 0,42 В (рисунок 3.11г). Отсутствие двух проводников уменьшает массу. Таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлен заявленный способ.

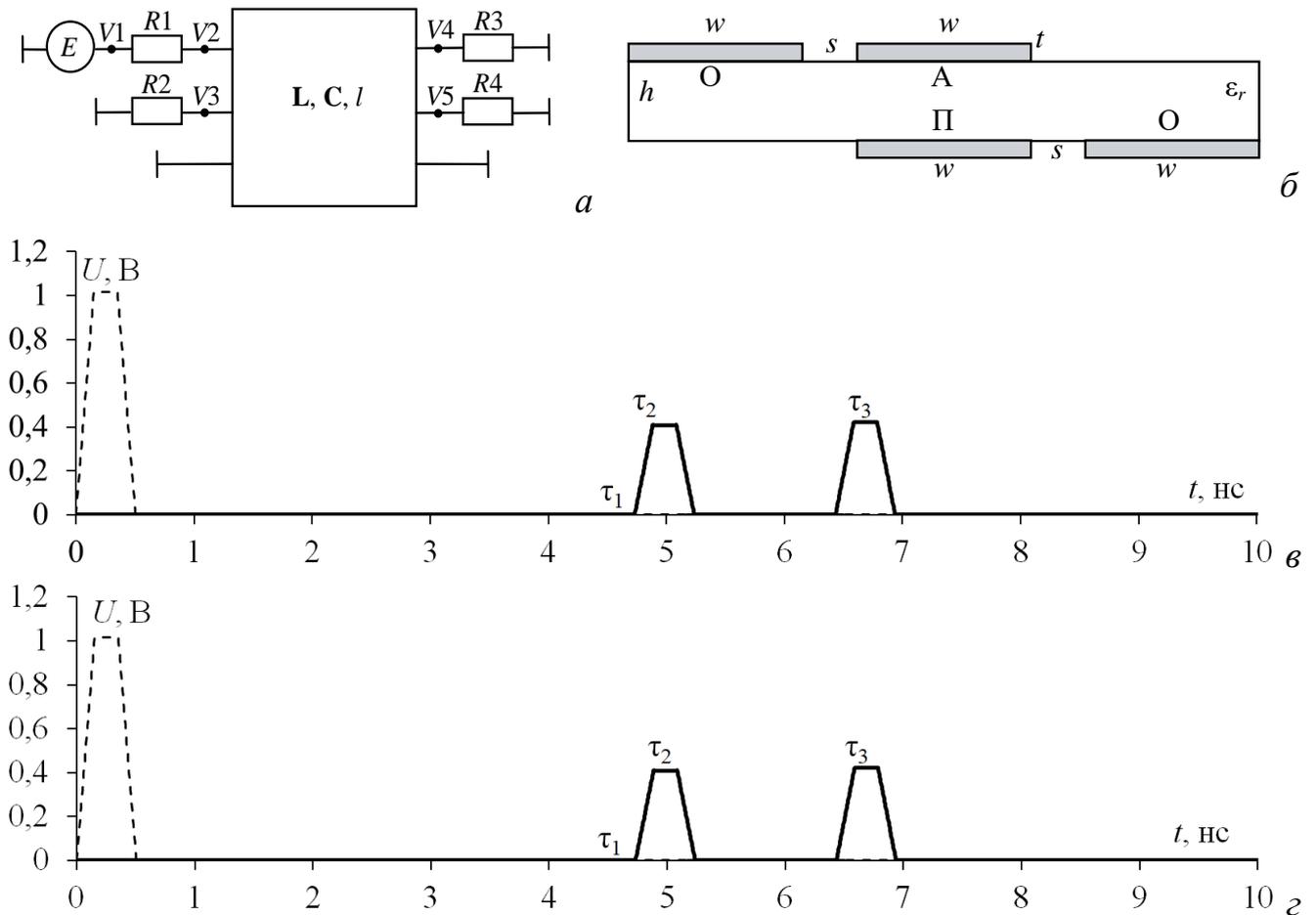


Рисунок 3.11 – Эквивалентная схема (а), поперечное сечение (б) и формы напряжений на входе (- -) и выходе (—) при подаче СКИ на активный (е) и пассивный (з) проводники структуры, реализующей заявленный способ

### 3.1.2.3 Оптимизация и исследование модального фильтра со всеми опорными проводниками

В подразделе 3.1.1 показано, что уменьшение  $h$  позволяет достичь большей разности погонных задержек мод, поэтому при оптимизации  $h$  принята 500 мкм, что близко к минимальной толщине отечественного стеклотекстолита, когда он еще не гибкий. На рисунке 3.12 показано влияние  $t$  при  $w=1000$  мкм и  $s=2000$  мкм. Видно, что оно незначительно, поэтому принято  $t=18$  мкм. Следовательно, выполнялась оптимизация лишь параметров  $s$  и  $w_1$ , в диапазоне от 500 до 2000 мкм, а  $w_2$  принято 500 мкм.

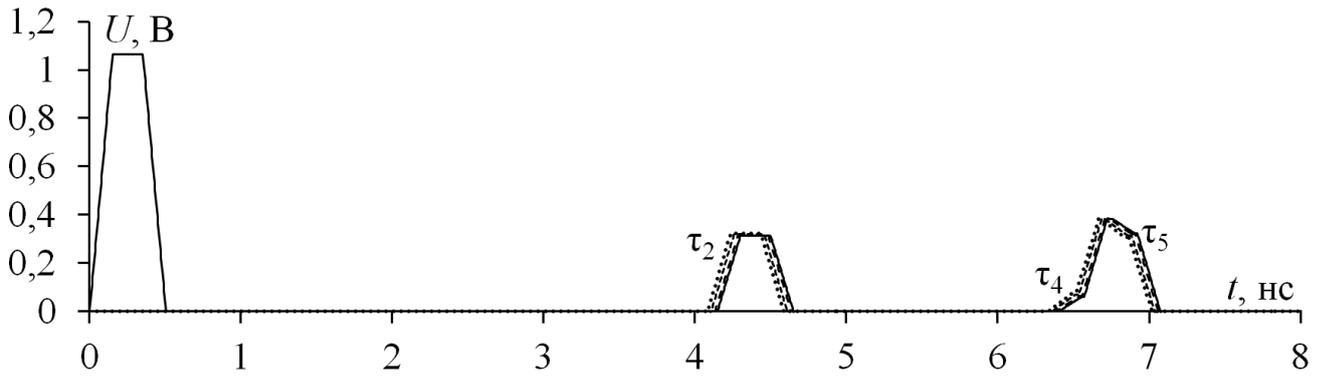


Рисунок 3.12 – Формы напряжения на входе (—) и выходе МФ

при  $t=18$  (—),  $35$  (---),  $70$  (- -) и  $105$  (· ·) мкм

На рисунках 3.13–3.15 показаны вычисленные временные отклики при разных значениях  $w$  и  $s$ . Видно, что с увеличением  $s$  и  $w$  увеличивается разность задержек импульсов 2 и 5, а у 3 и 5 она уменьшается, так что они накладываются друг на друга. При малых значениях  $s$  на выходе МФ три импульса, однако ослабление меньше, за счет того, что амплитуда импульса 2 больше. Уменьшение амплитуды второго импульса возможно за счет увеличения  $s$  и  $w$ .

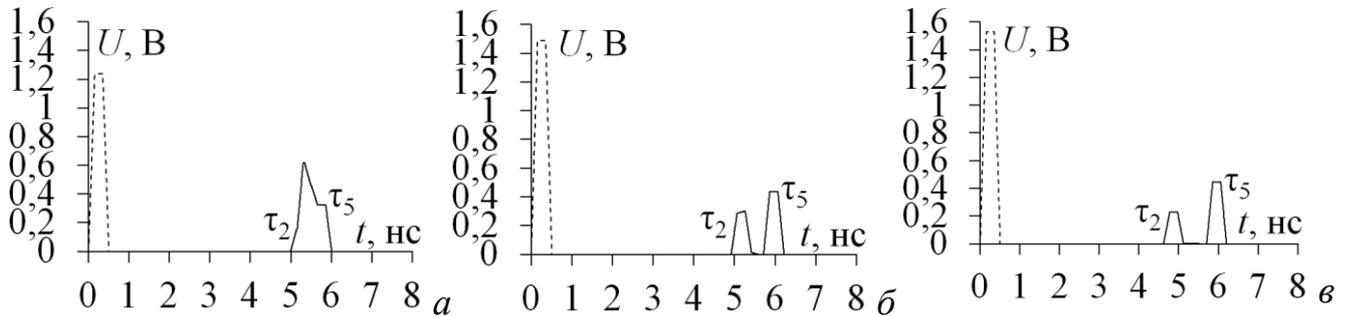


Рисунок 3.13 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ при  $w=500$  мкм

и  $s=500$  (а),  $1000$  (б) и  $2000$  (в) мкм

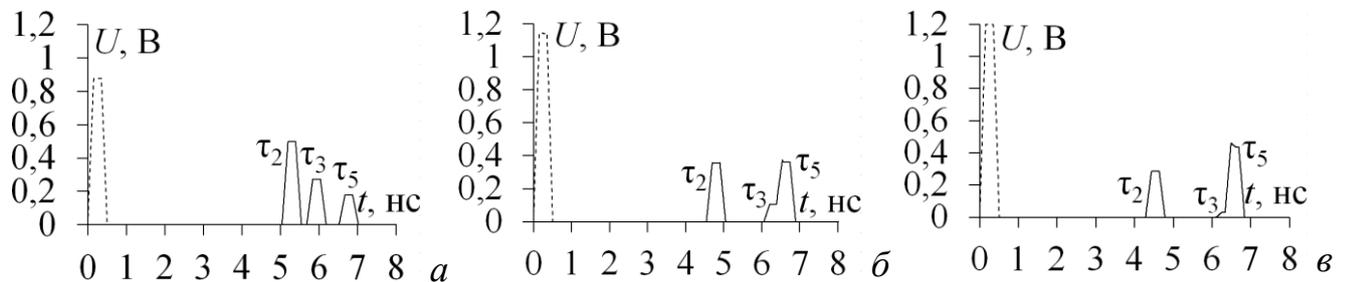


Рисунок 3.14 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ при  $w=1000$  мкм

и  $s=500$  (а),  $1000$  (б) и  $2000$  (в) мкм

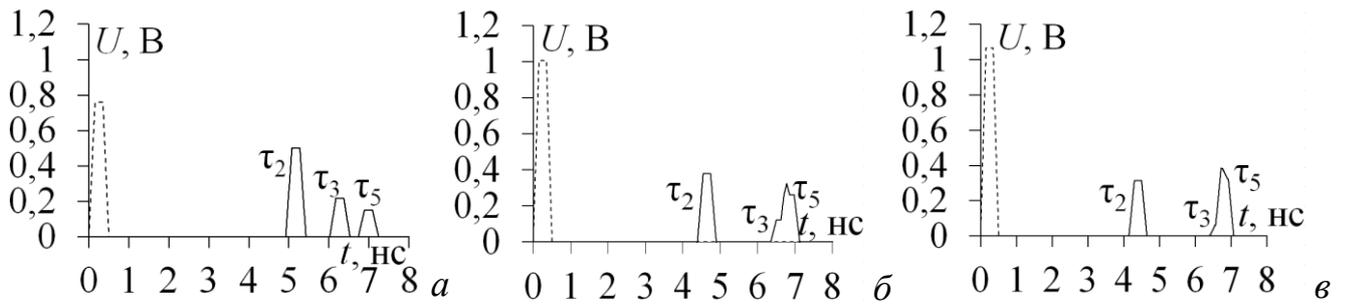


Рисунок 3.15 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при  $w=2000$  мкм и  $s=500$  (а),  $1000$  (б) и  $2000$  (в) мкм

Для выравнивания амплитуд двух импульсов диапазон  $w$  увеличен до  $3500$  мкм. Так, при  $w_1=3150$  мкм,  $w_2=500$  мкм и  $s=2000$  мкм достигнуто выравнивание амплитуд импульсов разложения с амплитудой  $0,309$  В, что соответствует ослаблению в  $3,2$  раза по отношению к половине э.д.с., а разность погонных задержек мод 5 и 2 составила  $2,35$  нс/м. Подтверждающие формы напряжения на входе и выходе МФ показаны на рисунке 3.16.

Результаты моделирования с граничными условиями на концах пассивного проводника КЗ-ХХ и ХХ-КЗ показаны на рисунке 3.17. Теперь ослабление ( $5,6$  раза) определяется амплитудой дополнительных импульсов (на рисунке 3.17 обозначены как 1 и 2), которая чуть больше, чем у основных (первых).

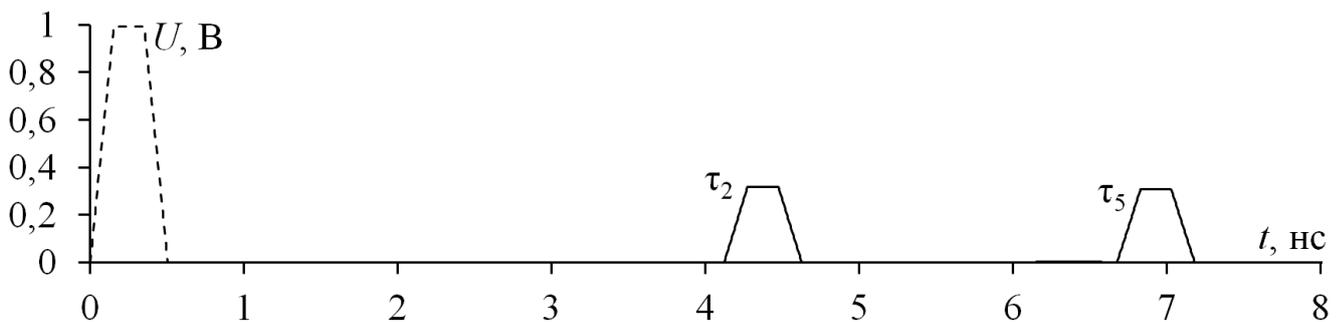


Рисунок 3.16 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при  $w_1=3150$  мкм,  $w_2=500$  мкм,  $s=2000$  мкм,  $h=500$  мкм и  $t=18$  мкм

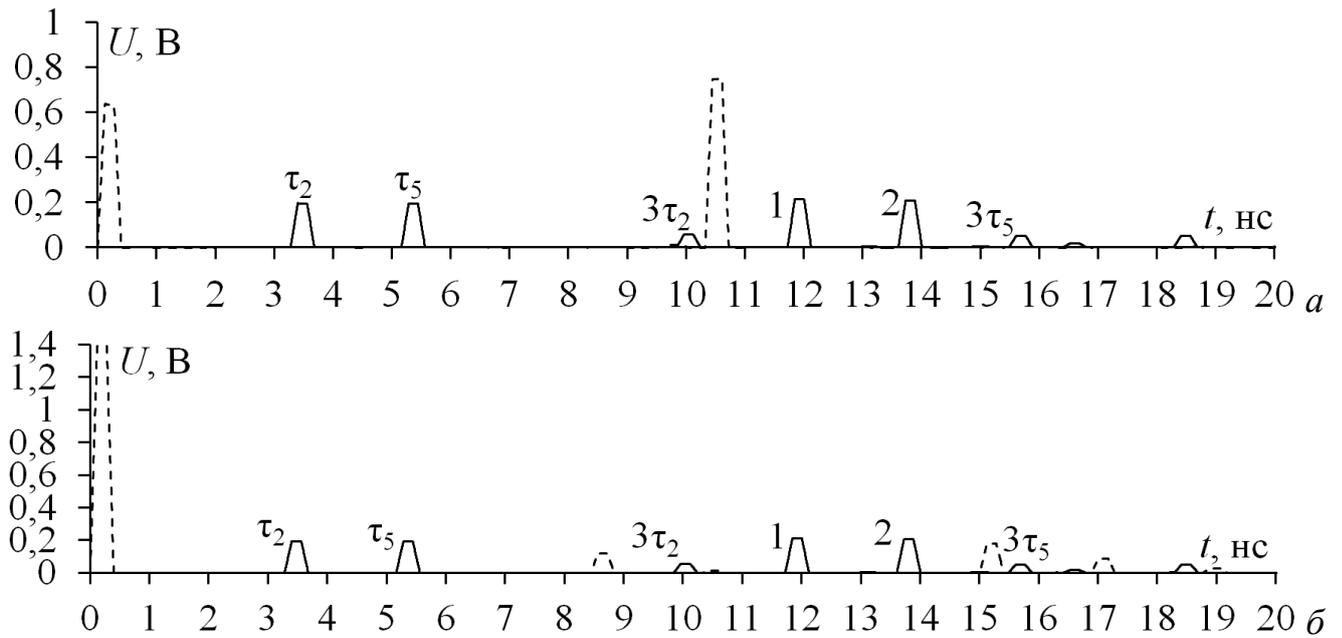


Рисунок 3.17 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ  
при КЗ-XX (а) и XX-КЗ (б)

Выполнено моделирование влияния ширины опорных проводников ( $w_2$ ) при  $w_1=3150$  мкм и  $s=2000$  мкм. Так,  $w_2$  менялась в диапазоне от 500 до 1000 мкм с шагом 100 мкм. Графики зависимости  $\tau_i$  и  $U_i$  от  $w_2$  приведены на рисунке 3.18. Видно, что с увеличением  $w_2$  амплитуда незначительно, но становится больше. Так, при  $w_2=500$  мкм амплитуды двух основных импульсов выровнены.

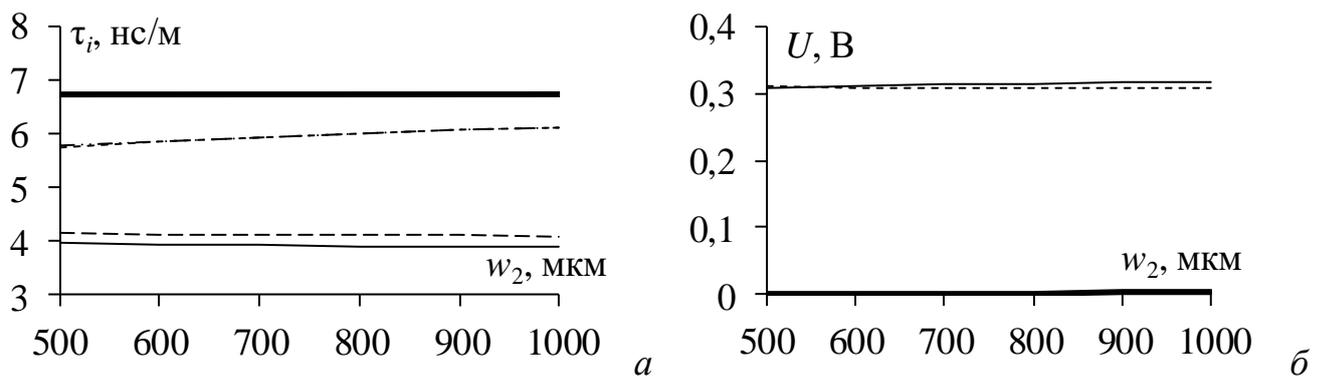


Рисунок 3.18 – Зависимости  $\tau_1$ (—),  $\tau_2$ (- -),  $\tau_3$ (- - -),  $\tau_4$ (- - - -),  $\tau_5$ (-) от  $w_2$  (а)  
и  $U_2$  (-),  $U_4$  (-),  $U_5$  (- -) (б) от  $w_2$

Достигнуто выравнивание разностей соседних задержек трех импульсов. Так, при  $h=0,5$  мкм,  $t=150$  мкм,  $w=1768$  мкм и  $s=100$  мкм разности составляют 1,065 нс/м. Формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунке 3.19.

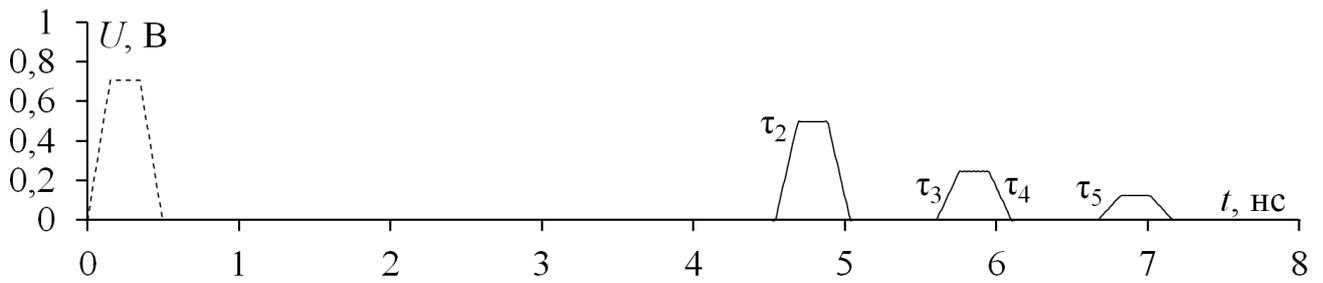


Рисунок 3.19 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

Таким образом, при  $w_1=3150$  мкм,  $w_2=500$  мкм и  $s=2000$  мкм достигнуто ослабление 3,2 раза при  $R_2=R_4=50$  Ом и 5,6 раза при ХХ-КЗ, а также максимизирована разность погонных задержек мод 2 и 5 до 2,35 нс/м. При  $h=0,5$  мкм,  $t=150$  мкм,  $w=1768$  мкм и  $s=100$  мкм достигнуты максимизация и выравнивание разностей погонных задержек трех мод (1,065 нс/м), которые видно при малых значениях  $s$ .

### 3.1.3 Оптимизация модального фильтра

#### с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины

Выполнены исследование и оптимизация МФ с опорными проводникам, соединенными вдоль всей длины. Оптимизация выполнялась в диапазоне параметров:  $h=0,5$ ; 1 мм,  $t=18$ ; 35; 70; 105 мкм,  $w$  от 500 до 5000 мкм и  $s$  от 500 до 2000 мкм (с шагом 500 мкм). Вычислены временные отклики для всех значений изменяемых параметров, но приведены результаты, только для набора параметров, где достигнуто выравнивание амплитуд импульсов. В таблицу 3.5 сведены значения погонных задержек ( $\tau_i$ ) и амплитуд импульсов на выходе МФ ( $U_i$ ) при  $t=18$  мкм. Для наглядного представления влияния параметров на разложение СКИ, на рисунках 3.20 и 3.21 приведены формы сигнала на входе и выходе МФ. Минимальная амплитуда 0,325 В и максимальная разность погонных задержек мод 2,424 нс/м достигнуты при  $h=0,5$  мм,  $s=2000$  мкм и  $w=3000$  мкм. Влияние  $t$  на выходные характеристики приведено на рисунке 3.22.

Таблица 3.5 – Вычисленные значения характеристик МФ с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины

$h$ , мм	$s$ , мкм	$w$ , мкм	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$\tau_2 - \tau_1$ , нс/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В
0,5	500	1470	4,593	6,201	1,608	0,430	0,430
	1000	2095	4,301	6,338	2,037	0,382	0,382
	1500	2570	4,130	6,399	2,269	0,350	0,350
	2000	3000	4,015	6,439	2,424	0,325	0,325
1	500	2020	4,870	6,019	1,149	0,466	0,466
	1000	2945	4,615	6,217	1,602	0,431	0,431
	1500	3630	4,441	6,230	1,859	0,403	0,403
	2000	4270	4,310	6,353	2,043	0,378	0,378

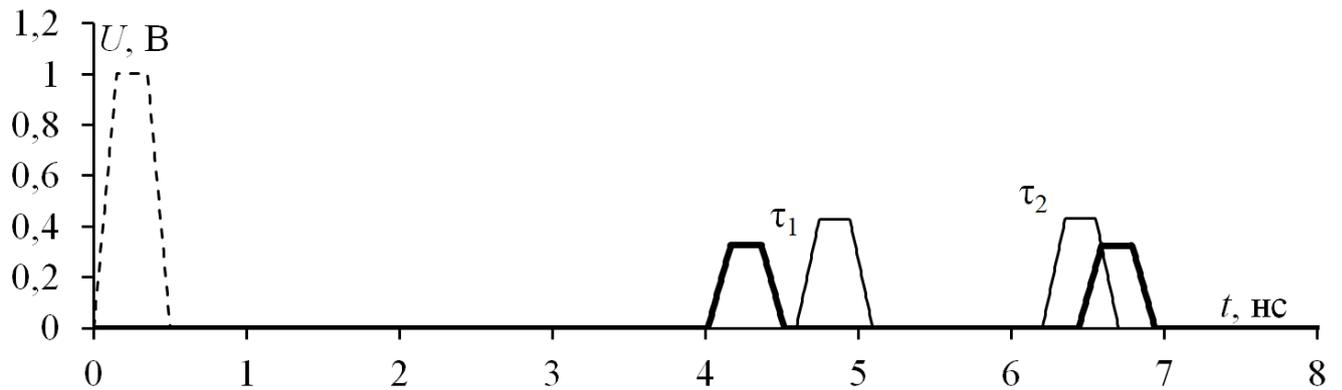


Рисунок 3.20 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе МФ при  $s=500$  мкм и  $w=1470$  мкм (-),  $s=2000$  мкм и  $w=3000$  мкм (-) при  $h=0,5$  мм

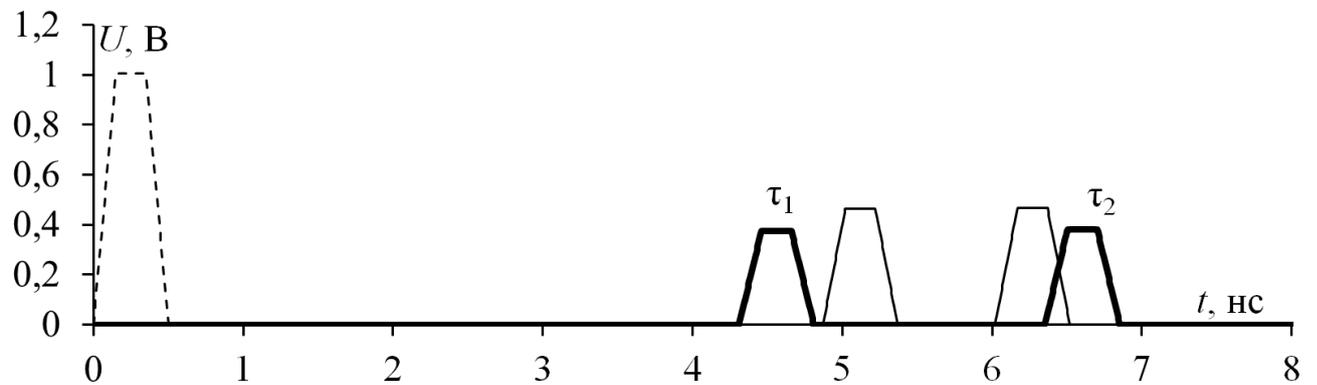


Рисунок 3.21 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе МФ при  $s=500$  мкм и  $w=2020$  мкм (-),  $s=2000$  мкм и  $w=4270$  мкм (-) при  $h=1$  мм

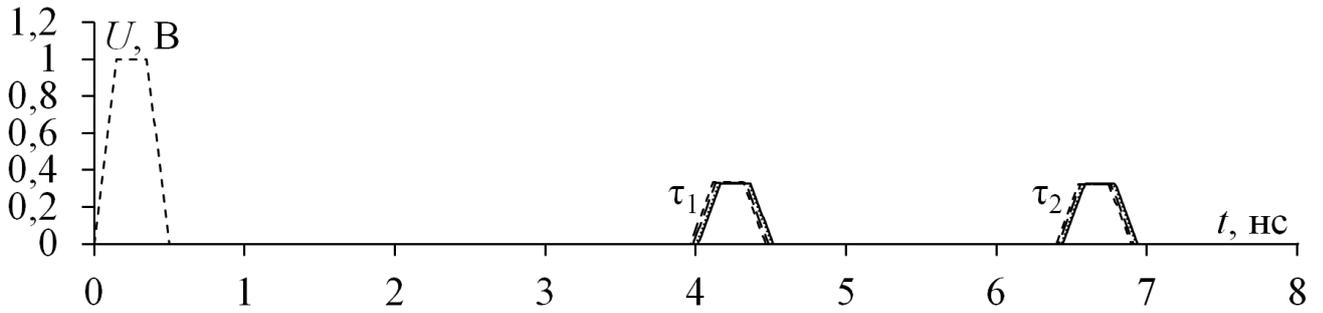


Рисунок 3.22 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе МФ при  $t = 18$  (-),  $35$  (. .),  $70$  (- -) и  $105$  (- -) мкм

При  $w=3000$  мкм,  $s=2000$  мкм,  $h=500$  мкм и  $t=18$  мкм вычислены временные отклики при изменении граничных условий на концах пассивного проводника (КЗ-ХХ и ХХ-КЗ). Формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунке 3.23. Ослабление составляет 4,5 раза.

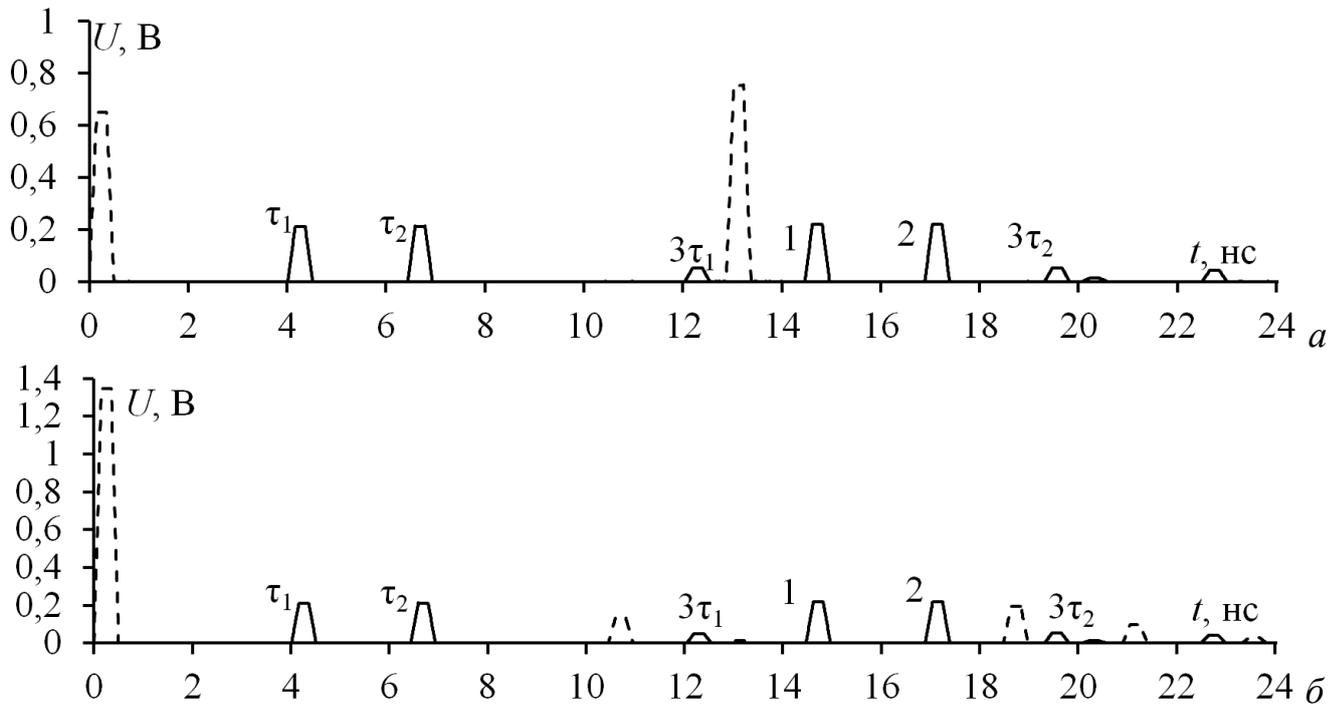


Рисунок 3.23 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при КЗ-ХХ (а) и ХХ-КЗ (б)

Таким образом, выполнена оптимизация МФ с опорными проводниками, соединёнными вдоль всей длины. При  $h=0,5$  мм,  $s=2000$  мкм и  $w_1=3000$  мкм достигнута разность погонных задержек мод  $2,424$  нс/м, а амплитуда импульсов составляет  $0,325$  В при согласованном случае и  $0,218$  В при КЗ-ХХ или ХХ-КЗ на концах пассивного проводника.

### 3.1.4 Влияние экрана на разложение импульса

В пункте 3.1.3 выполнена оптимизация МФ с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины. Они могут соединяться между собой, например, с помощью металлизированных отверстий. Однако, это можно сделать и с помощью экрана. Спецификой такого соединения является то, что на разложение СКИ будет влиять и экран, что актуально исследовать.

Для моделирования структуры выбран МФ со всеми опорными проводниками и МФ без двух диагональных опорных проводников. Поперечные сечения МФ приведены на рисунке 3.24, где:  $s$  – расстояние между проводниками,  $w$  – ширина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $h1$  – расстояние от проводника до экрана,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $t$  – толщина проводников. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит.

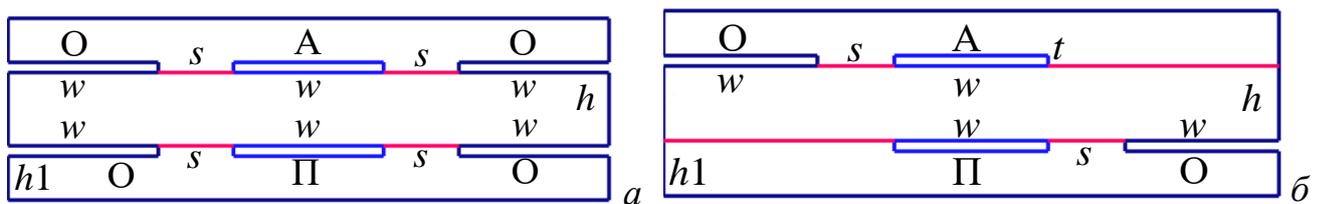


Рисунок 3.24 – Поперечные сечения МФ со всеми опорными проводниками (а) и без двух диагональных (б)

Моделирование выполнялось при одинаковых параметрах для двух МФ:  $t=35$  мкм,  $w=1500$  мкм,  $s=500$  мкм,  $h=h1=500$  мкм.

Полученные значения амплитуд импульсов и погонные задержки приведены в таблице 3.6, а формы напряжения на входе и выходе МФ – на рисунке 3.25. Видно, что на выходе МФ два импульса. Амплитуды первой («быстрой») моды, которая распространяется преимущественно в воздухе, одинакова для двух МФ, а задержки отличаются. Это обусловлено малым значением  $s$ , увеличивающим влияние опорных проводников: в МФ со всеми опорными проводниками оно больше, а без диагональных – меньше. Опорные проводники заставляют первую моду больше распространяться в диэлектрике. Поэтому, в МФ без двух диагональных проводников, она приходит быстрее. Вторая мода, которая

распространяется преимущественно в диэлектрике, приходит в обоих случаях в одно время и с одинаковой амплитудой.

Таблица 3.6 – Погонные задержки мод и амплитуды импульсов двух МФ

МФ с опорными проводниками	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$U_1$ В	$U_2$ В
Всеми	4,085	5,932	0,493	0,399
Двумя диагональными	4,013	5,935	0,490	0,399

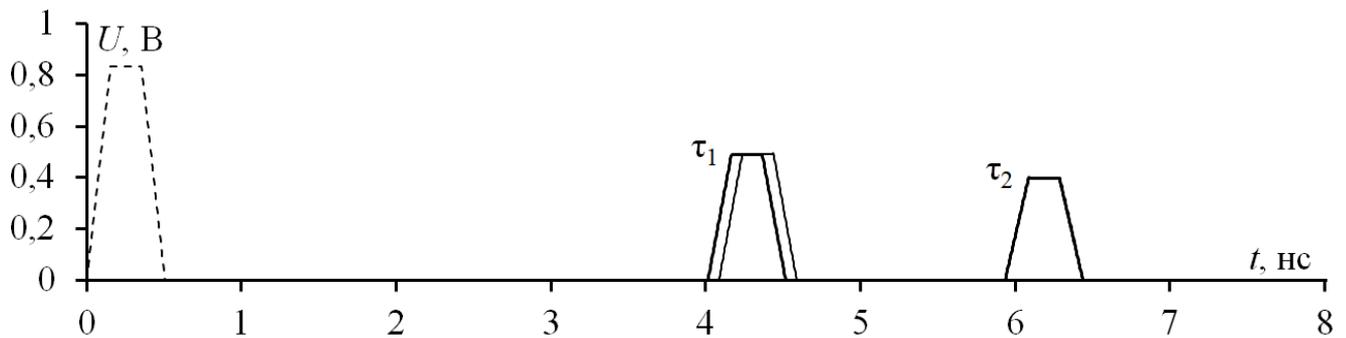


Рисунок 3.25 – Формы напряжения на входе МФ (- -)

и выходе МФ со всеми (-) опорными проводниками и без диагональных (—)

Рассмотрено влияние расстояния до опорных проводников. Значение  $s$  изменялось от 0,6 до 2 мм, с шагом 0,1 мм. В таблицу 3.7 сведены полученные значения амплитуд импульсов и погонных задержек при изменении  $s$  для двух МФ. Видно, что изменение  $s$  влияет больше всего на время прихода первой моды. На рисунке 3.26 приведена зависимость  $\tau_1$  от  $s$ . Из графика видно, что с увеличением  $s$  значения  $\tau_1$  становятся меньше и сближаются. Это объясняется тем, что при отдалении опорных проводников МФ становятся более симметричными относительно их центра. Как следствие, на выходе двух МФ можно наблюдать одинаковые отклики. Формы напряжения на входе и выходе двух МФ при  $s=0,6$  мм и 2 мм показаны на рисунке 3.27.

Таблица 3.7 – Погонные задержки мод и амплитуды импульсов для двух МФ при разных  $s$

$s$ , мм	Со всеми опорными проводниками				Без двух диагональных проводников			
	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В
0,6	4,019	5,934	0,491	0,399	3,961	5,936	0,489	0,399
0,7	3,966	5,936	0,489	0,399	3,919	5,937	0,488	0,399
0,8	3,923	5,936	0,488	0,399	3,885	5,937	0,487	0,399
0,9	3,889	5,937	0,487	0,399	3,858	5,937	0,486	0,399
1	3,861	5,937	0,486	0,399	3,836	5,937	0,486	0,399
1,1	3,838	5,937	0,485	0,399	3,819	5,937	0,484	0,399
1,2	3,821	5,937	0,485	0,399	3,805	5,937	0,484	0,399
1,3	3,806	5,937	0,484	0,399	3,794	5,937	0,484	0,399
1,4	3,795	5,937	0,484	0,399	3,785	5,937	0,483	0,399
1,5	3,786	5,937	0,484	0,399	3,779	5,937	0,484	0,399
1,6	3,779	5,937	0,484	0,399	3,772	5,937	0,483	0,399
1,7	3,773	5,937	0,484	0,399	3,768	5,937	0,483	0,399
1,8	3,768	5,937	0,484	0,399	3,764	5,937	0,484	0,399
1,9	3,765	5,937	0,484	0,399	3,761	5,937	0,484	0,399
2	3,762	5,937	0,483	0,399	3,759	5,937	0,483	0,399

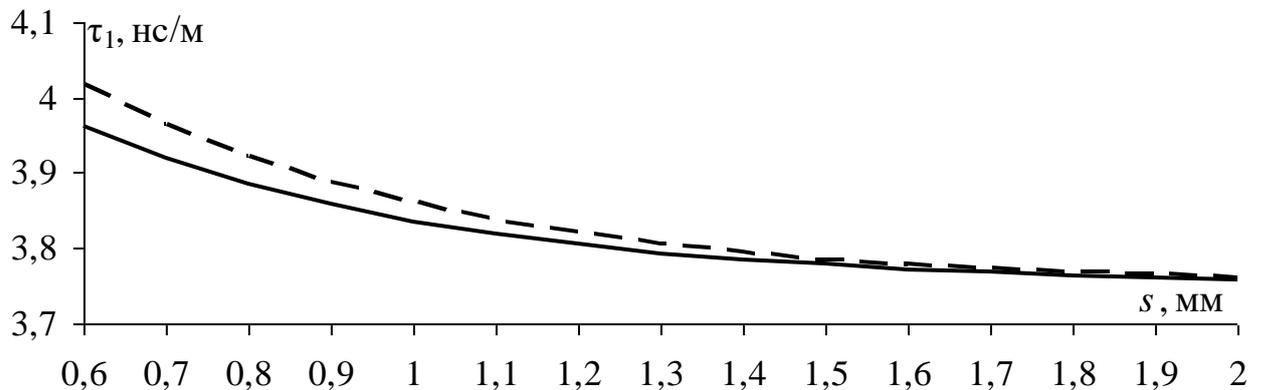


Рисунок 3.26 – Зависимости  $\tau_1$  от  $s$  для МФ

со всеми опорными проводниками (-) и без двух диагональных (- -)

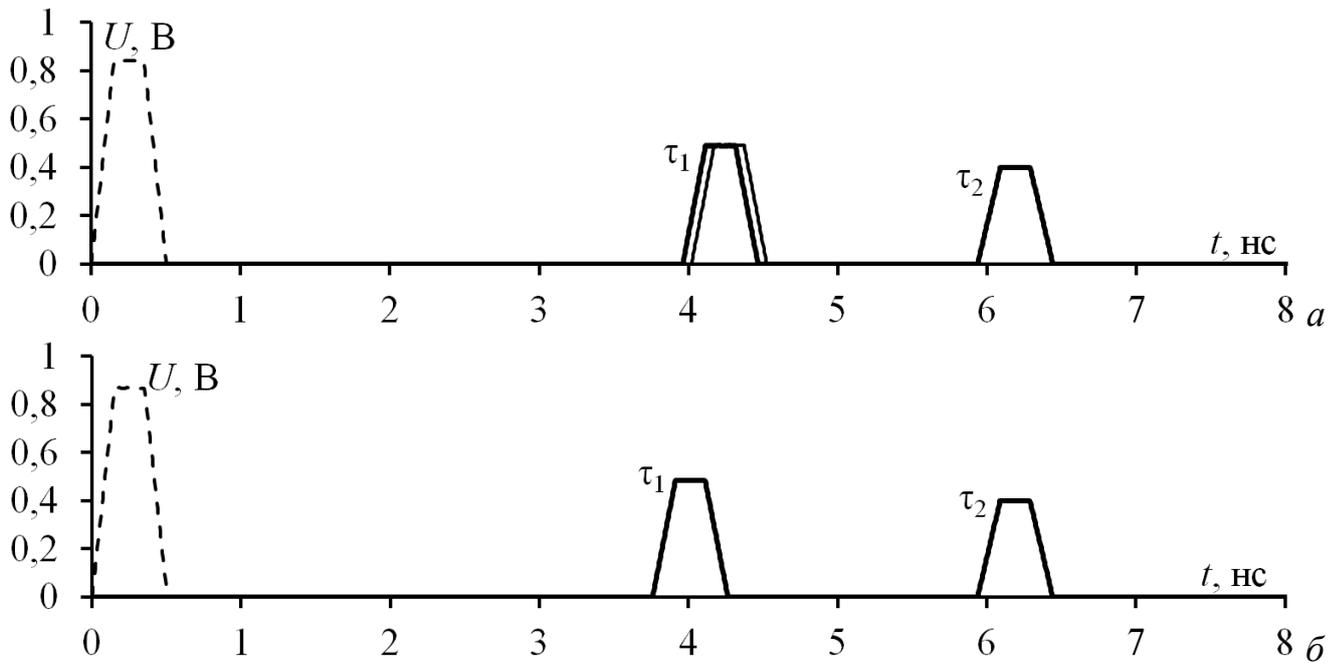


Рисунок 3.27 – Формы напряжения на входе МФ (---) и выходе МФ со всеми опорными проводниками (—) и без двух диагональных (-) при  $s=0,6$  (a),  $2$  (б) мм

Рассмотрено изменение расстояния от проводников до экрана ( $h1$ ) от  $0,5$  мм до  $10$  мм, с шагом  $0,5$  мм. Соответствующие зависимости погонных задержек мод  $\tau_i$  и амплитуд импульсов  $U_i$  на выходе МФ приведены на рисунке 3.28. Видно, что при увеличении  $h1$  значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  становятся больше для обоих МФ. Однако разность погонных задержек мод становится меньше. Так, для МФ со всеми проводниками, при  $h1=0,5$  мм  $\tau_2-\tau_1=1,84$  нс/м и при  $h1=10$  мм  $\tau_2-\tau_1=1,77$  нс/м, а для МФ без диагональных проводников –  $1,92$  нс/м и  $1,82$  нс/м соответственно. При  $h1>3$  мм  $\tau_i$  почти перестает изменяться для обоих МФ, т.е. влияние экрана на разложение СКИ почти отсутствует. Для обоих МФ, с увеличением  $h1$ , уменьшается  $U_1$  и увеличивается  $U_2$ . Однако, из-за того, что мода 1 распространяется преимущественно в воздухе, изменение  $h1$  больше влияет на  $U_1$ . Также, большее влияние на  $U_1$  наблюдается в МФ без двух диагональных проводников. При  $h1$  более  $5,5$  мм амплитуды импульсов почти выравнены ( $U_1=0,423$  В и  $U_2=0,421$  В). На  $U_2$  изменение  $h1$  влияет незначительно. Так, при  $h1>2,5$  мм  $U_2$  не изменяется (для обоих МФ  $U_2=0,421$  В). На рисунке 3.29 показаны примеры моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ.

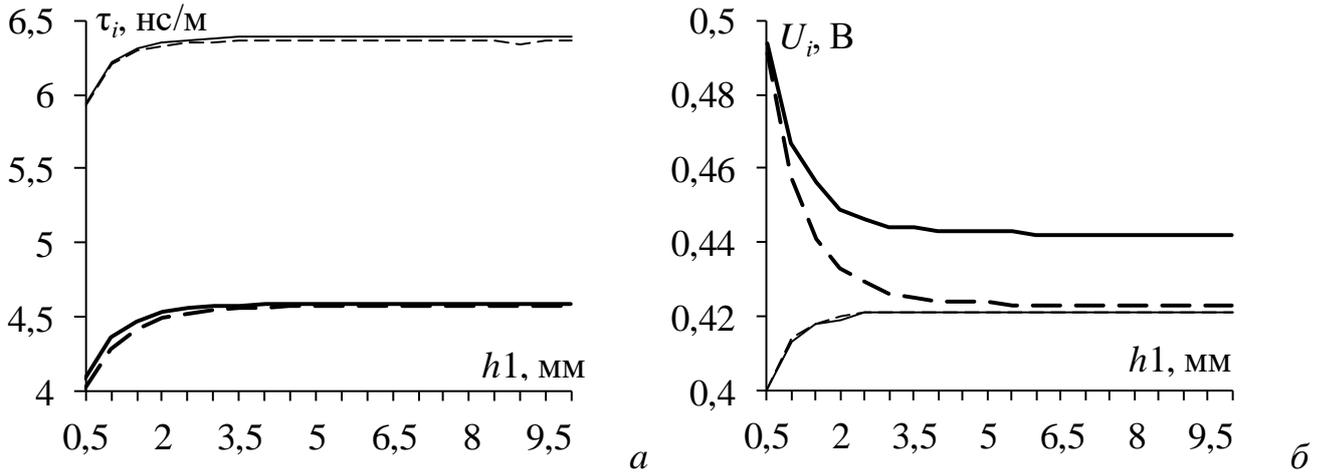


Рисунок 3.28 – Зависимости  $\tau_1$  (-),  $\tau_2$  (-) от  $h1$  (а) и  $U_1$  (-),  $U_2$  (-) от  $h1$  (б)

для МФ со всеми проводниками и  $\tau_1$  (- -),  $\tau_2$  (-) от  $h1$  (а)

и  $U_1$  (- -),  $U_2$  (-) от  $h1$  (б) для МФ без диагональных проводников

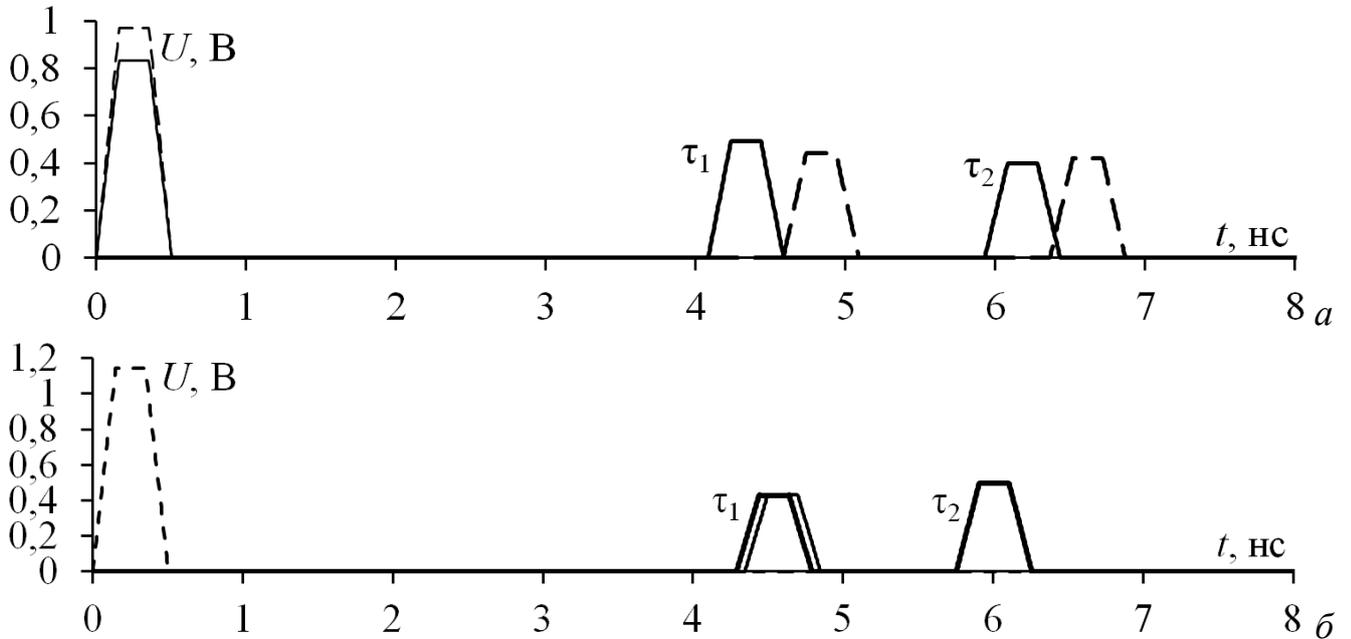


Рисунок 3.29 – Формы напряжения на входе МФ при  $h1=0,5$  мм (-),  $h1=10$  мм (- -)

и выходе МФ при  $h1=0,5$  мм (-),  $h1=10$  мм (- -)

для МФ со всеми опорными проводниками (а) и без двух диагональных (б)

Таким образом, показано, что соединение опорных проводников с помощью экрана в МФ на ДПП позволяет достичь примерно одинакового разложения СКИ вне зависимости от количества опорных проводников. Их влияние уменьшается и, фактически, заменяется экраном. На примере двух МФ показано влияние экрана на разложение СКИ. При увеличении  $h1$  значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  увеличиваются, однако их разность уменьшается. При отдалении экрана от проводников амплитуда первого

импульса уменьшается, а второго – увеличивается. Наибольшее влияние происходит на амплитуду первой моды. Большее влияние на  $U_1$  наблюдается в МФ без двух диагональных проводников. При  $h_1 > 3$  мм погонные задержки мод и амплитуды импульсов для двух МФ перестают изменяться. Это показывает, что влияние экрана (при таких параметрах МФ) становится минимальным.

### 3.1.5 Дополнительные импульсы во временном отклике модального фильтра на двухсторонней печатной плате

Здесь рассмотрено появление дополнительных импульсов в МФ на ДПП, а также в структурах, полученных из него удалением одного и двух опорных проводников.

Выполнено исследование влияния соединения опорных проводников на появление дополнительных импульсов в МФ на ДПП. Также, исследовано появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника, т.к. ослабление определяется амплитудой дополнительных импульсов. Для каждого из способов соединения опорных проводников появление дополнительных импульсов оценивалось для оптимизированных структур. Так, для МФ с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины, моделирование выполнялось при  $w=3000$  мкм,  $s=2000$  мкм,  $h=0,5$  мм и  $t=18$  мкм и при  $w_1=3150$  мкм,  $w_2=500$  мкм,  $s=2000$  мкм,  $h=0,5$  мм и  $t=35$  мкм с опорными проводниками, соединёнными на концах. Формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунках 3.30 и 3.31. Из представленных результатов видно, что в случае соединения опорных проводников только на концах, дополнительных импульсов больше при согласованном случае и при КЗ-ХХ. Так, если в первом случае соединения опорных проводников при КЗ-ХХ их 2, а при  $R_2=R_4=50$  Ом их нет вовсе, то во втором случае соединения их 4 и 7 соответственно. В таблицах 3.8 и 3.10 приведены получившиеся комбинации и время прихода дополнительных

импульсов. Задержки дополнительных импульсов также определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии.

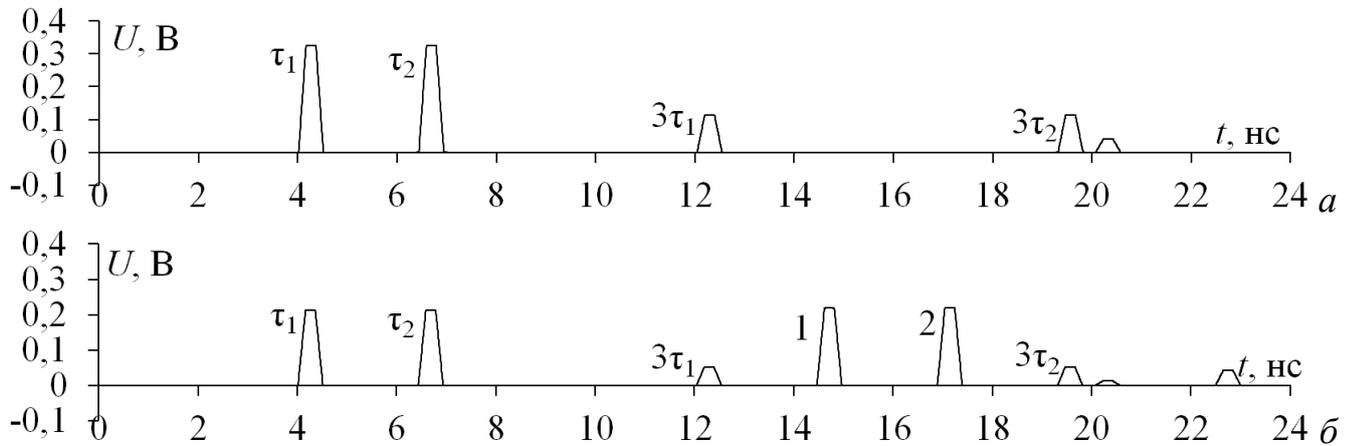


Рисунок 3.30 – Формы напряжения на выходе МФ с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины, при  $R_2=R_4=50$  Ом (а) и КЗ-XX (б)

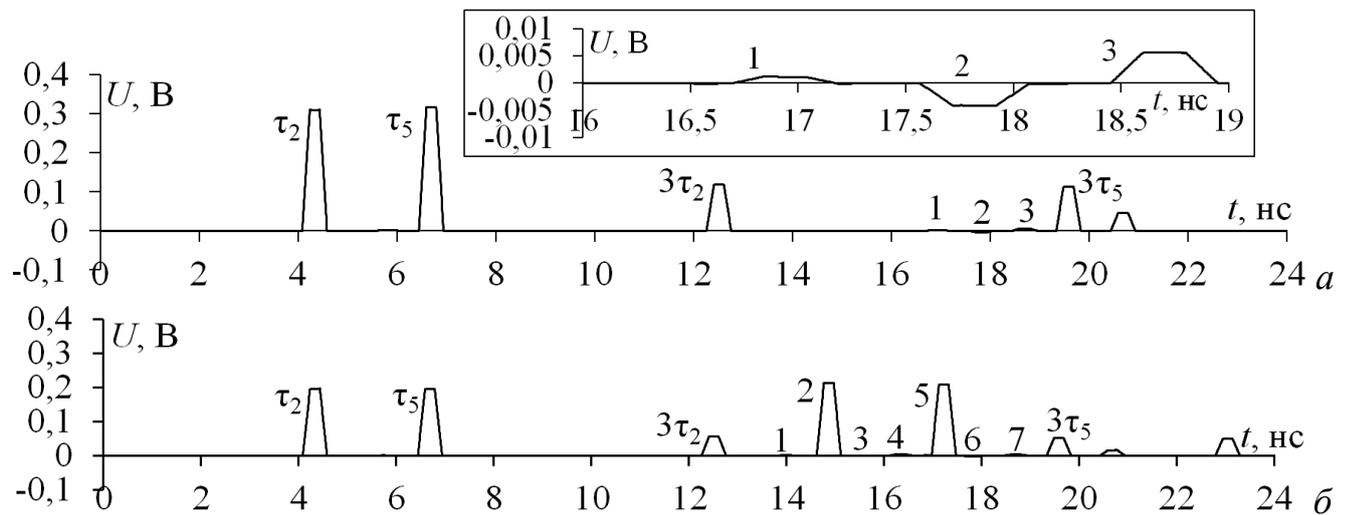


Рисунок 3.31 – Формы напряжения на выходе МФ с опорными проводниками, соединенными на концах, при  $R_2=R_4=50$  Ом (а) и КЗ-XX (б)

Таблица 3.8 – Погонные задержки мод (нс/м) и время (нс) прихода дополнительных импульсов с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины

$\tau_1$	$\tau_2$	$3\tau_1$	$3\tau_2$	1	2
				$l(2\tau_1+\tau_2)$	$l(\tau_1+2\tau_2)$
4,015	6,439	12,045	19,317	14,469	16,893

Таблица 3.9 – Одинарные и тройные погонные задержки мод (нс/м) с опорными проводниками, соединенными на концах

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$3\tau_1$	$3\tau_2$	$3\tau_3$	$3\tau_4$	$3\tau_5$
3,892	4,087	5,558	5,562	6,4445	11,675	12,261	16,674	16,686	19,334

Таблица 3.10 – Параметры дополнительных импульсов МФ с опорными проводниками, соединенными на концах

R2=R4=50 Ом							
№ импульса	1		2		3		
Комбинация	$l(2\tau_3+\tau_4)$		$l(\tau_5+2\tau_4)$		$l(2\tau_5+\tau_4)$		
Время прихода, нс	16,678		17,568		18,451		
K3-XX							
№ импульса	1	2	3	4	5	6	7
Комбинация	$l(\tau_4+2\tau_2)$	$l(\tau_5+2\tau_2)$	$l(\tau_2+2\tau_4)$	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	$l(2\tau_5+\tau_2)$	$l(2\tau_4+\tau_5)$	$l(2\tau_5+\tau_3)$
Время прихода, нс	13,736	14,618	15,211	16,089	16,976	17,568	18,447

Интересно исследование дополнительных импульсов при соединении опорных проводников на концах, удалении одного и двух опорных проводников и большей связи между сигнальными и опорными проводниками. Для исключения наложения импульсов, из-за чего сложно определить их задержки и вычислить их возможные комбинации, длительность импульса уменьшена до 150 пс, а значение  $l$  увеличено до 1,5 м.

На рисунке 3.32 показаны результаты моделирования на выходе МФ со всеми проводниками. В таблице 3.11 приведены значения погонных задержек и времени прихода мод. Так, между пятью импульсами с одним проходом по линии дополнительных импульсов нет, тогда как с тройным проходом и дальше – они есть. На выходе МФ между моментами времени  $l3\tau_3$  и  $l3\tau_5$  есть 2 дополнительных импульса, тогда как при оптимизированной структуре их явно выражено 3. Также видно, что полярность всех дополнительных импульсов стала отрицательной, амплитуда увеличилась. В таблице 3.12 приведено время прихода дополнительных импульсов.

Таблица 3.11 – Погонные задержки (нс/м) и время (нс) прихода импульсов мод

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$	$l\tau_4$	$l\tau_5$
4,556	5,059	5,743	5,883	6,432	6,834	7,589	8,615	8,824	9,649

Таблица 3.12 – Параметры дополнительных импульсов

№ импульса	Комбинация	Время прихода, нс
1	$l(2\tau_3+\tau_5)$	26,879
2	$l(2\tau_5+\tau_3)$	27,913

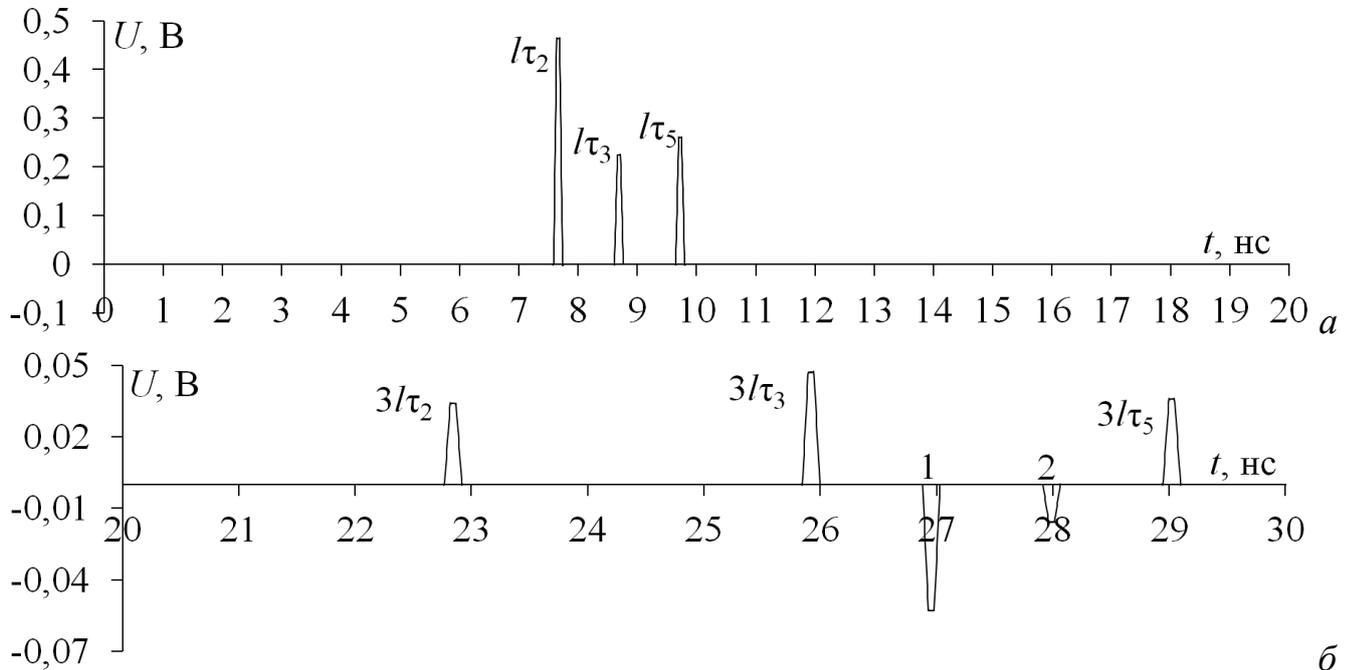


Рисунок 3.32 – Формы напряжения на выходе МФ с одним (а) и тройным (б) прохождениями по линии импульсов мод

На рисунке 3.33 показаны результаты моделирования на выходе МФ с удалением одного опорного проводника. Так как при удалении верхнего опорного проводника результаты моделирования одинаковы, то приведены результаты моделирования, только для МФ без верхнего и нижнего левых опорных проводников. Погонные задержки и время прихода мод, для МФ без одного опорного проводника одинаковы, поэтому в таблице 3.13 одни. В таблице 3.14 приведены получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов 1–16. Из приведённых результатов видно, что с удалением одного опорного проводника дополнительных импульсов стало больше. В двух структурах МФ количество и полученные комбинации дополнительных импульсов совпадают, но меняется их полярность и амплитуда. Так, например, при удалении верхнего проводника импульсы 2, 3, 5, 8 и 12 имеют отрицательную полярность, тогда как при удалении нижнего – положительную. Для двух МФ дополнительный импульс 14 имеет максимальную и отрицательную полярность, с

амплитудой 0,00924 В для МФ без верхнего и 0,125 В без нижнего опорного проводника. Задержки дополнительных импульсов определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии.

Таблица 3.13 – Погонные задержки (нс/м) и время (нс) прихода импульсов мод МФ без одного опорного проводника

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$	$l\tau_4$
4,660	5,116	5,801	6,352	6,989	7,674	8,701	9,528

Таблица 3.14 – Параметры дополнительных импульсов МФ без одного опорного проводника

№ импульса	Комбинация	Время прихода
1	$l(2\tau_1+\tau_2)$	21,6539
2	$l(2\tau_2+\tau_1)$	22,3380
3	$l(2\tau_1+\tau_3)$	22,6909
4	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	23,3650
5	$l(2\tau_1+\tau_4)$	23,5078
6	$l(2\tau_2+\tau_3)$	24,0491
7	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_4)$	24,1910
8	$l(2\tau_3+\tau_1)$	24,3920
9	$l(2\tau_2+\tau_4)$	24,8760
10	$l(2\tau_3+\tau_2)$	25,0761
11	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	25,2189
12	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_4)$	25,9030
13	$l(2\tau_4+\tau_2)$	26,7299
14	$l(2\tau_3+\tau_4)$	26,9300
15	$l(2\tau_4+\tau_3)$	27,7569
16	$l(2\tau_1+\tau_2)$	21,6539

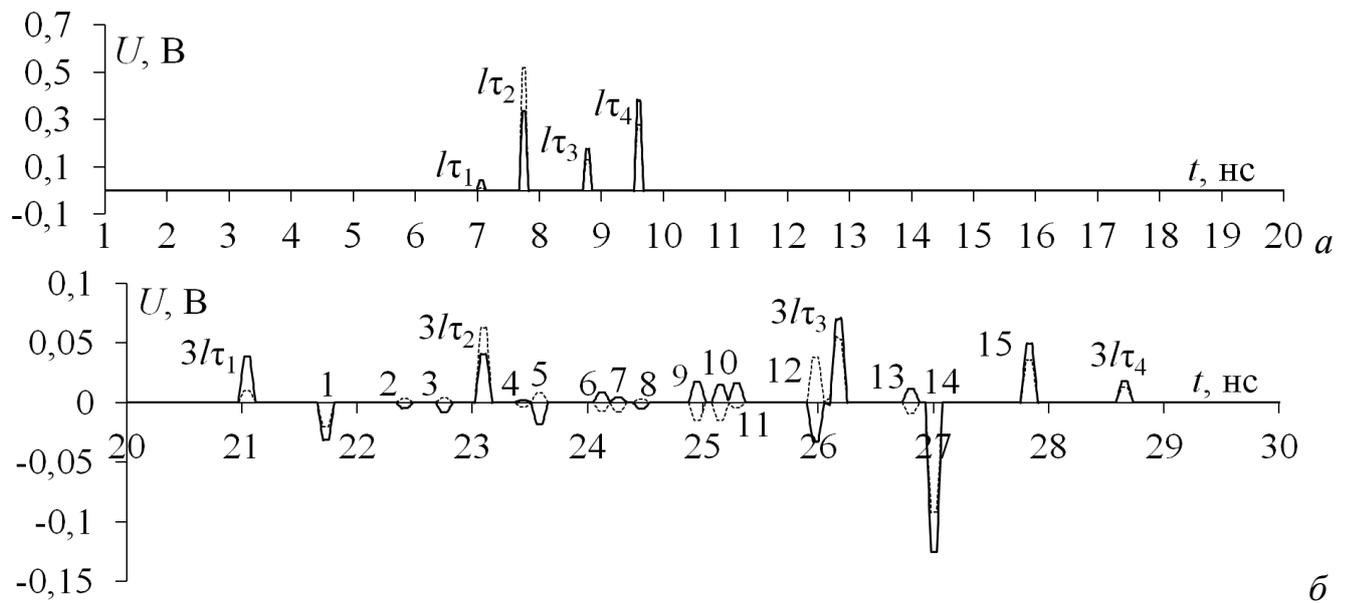


Рисунок 3.33 – Формы напряжения на выходе МФ с одним (а) и тройным (б) проходами по линии импульсов без верхнего (-) и нижнего левого (- -) опорных проводников

На рисунках 3.34 и 3.35 показаны результаты моделирования на выходе МФ с удалением двух опорных проводников. Погонные задержки и время прихода мод, для каждого из МФ, приведены в таблицах 3.15 и 3.16. В таблице 3.17 приведены получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов 1 и 2. Из приведённых результатов видно, что с удалением двух опорных проводников дополнительных импульсов стало меньше. Полярности импульсов в двух МФ одинаковы, но в МФ без левых опорных проводников амплитуды импульсов больше.

Таблица 3.15 – Погонные задержки (нс/м) и время (нс) прихода импульсов мод МФ без двух левых опорных проводников

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$
4,85146	5,80095	6,35339	7,27719	8,701425	9,530085

Таблица 3.16 – Погонные задержки (нс/м) и время (нс) прихода импульсов мод МФ без двух диагональных опорных проводников

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$
4,78421	5,15217	6,24241	7,176315	7,728255	9,363615

Таблица 3.17 – Параметры дополнительных импульсов МФ без двух опорных проводников

№ импульса	Без двух левых		Без двух диагональных	
	Комбинация	Время прихода, нс	Комбинация	Время прихода, нс
1	$l(2\tau_2+\tau_3)$	26,9329	$l(2\tau_1+\tau_3)$	21,7162
2	$l(2\tau_3+\tau_2)$	27,7616	$l(2\tau_3+\tau_1)$	25,9035

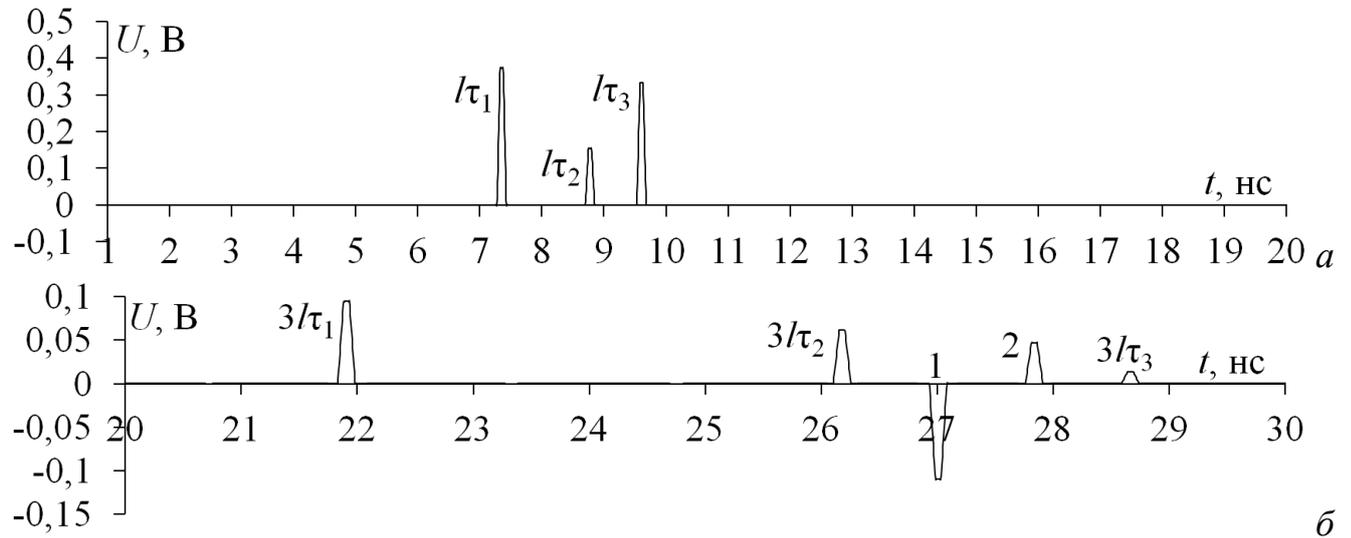


Рисунок 3.34 – Формы напряжения на выходе МФ без двух левых опорных проводников с одним (а) и тройным (б) проходом импульсов по линии

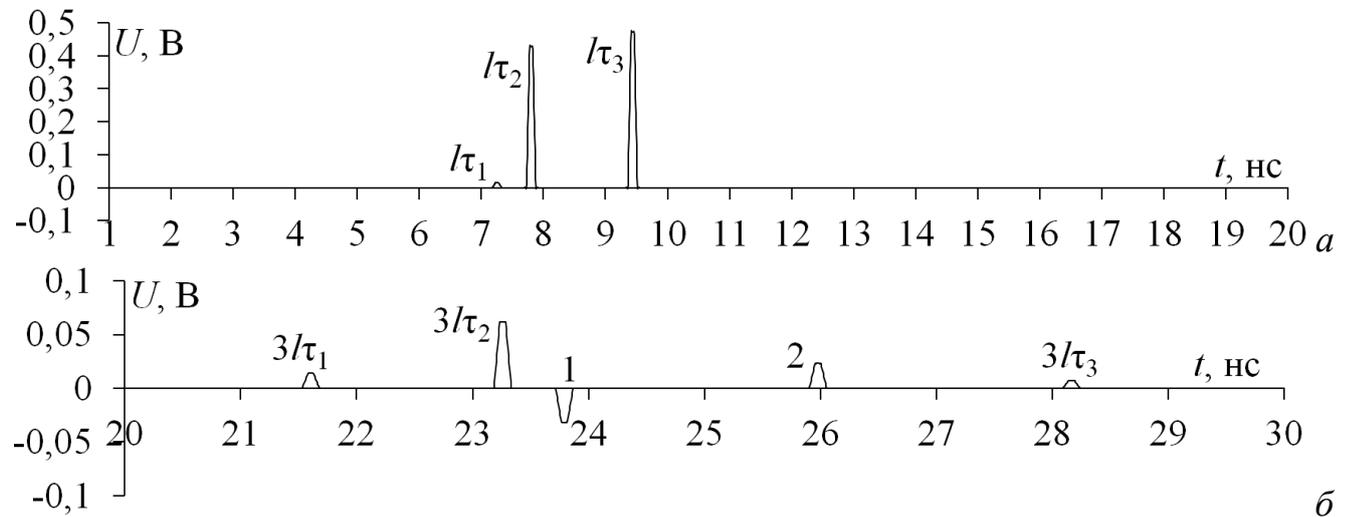


Рисунок 3.35 – Формы напряжения на выходе МФ без двух диагональных опорных проводников с одним (а) и тройным (б) проходом импульсов по линии

Таким образом, показано, что на появление, полярность и амплитуду дополнительных импульсов влияют не только соединение опорных проводников и граничные условия на концах пассивного проводника, но и параметры поперечного сечения МФ.

## 3.2 Анализ и оптимизация модального фильтра на двухсторонней печатной плате с лицевыми и боковыми связями

Здесь представлены результаты анализа и оптимизации МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями, а также в структурах, полученных путем удаления из него одного и двух пассивных проводников. Оптимизация выполнялась по трем критериям: максимизации разности максимальной и минимальной задержек импульсов, выравнивания разностей задержек соседних импульсов разложения и минимизации амплитуд импульсов разложения исходного СКИ.

### 3.2.1 Описание структуры и предварительное моделирование

Данная структура может быть получена путем добавления пассивных проводников в рассмотренный ранее МФ на ДПП, хотя впервые она была предложена для трехкратного модального резервирования [133]. Поперечное сечение МФ приведено на рисунке 3.36а. Параметры:  $h$  – толщина диэлектрика,  $w_1$  – ширина активного и пассивных проводников,  $w_2$  – ширина опорных проводников,  $s_1$  – расстояние между активным и пассивным проводниками,  $s_2$  – расстояние между сигнальными и опорными проводниками,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $t$  – толщина фольги. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит ( $\epsilon_r=4,5$ ).

Схема для моделирования представлена на рисунке 3.36б. Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . На другом конце активный проводник соединен с нагрузкой  $R5$ . Значения сопротивлений  $R1$ – $R7$  приняты равными 50 Ом.

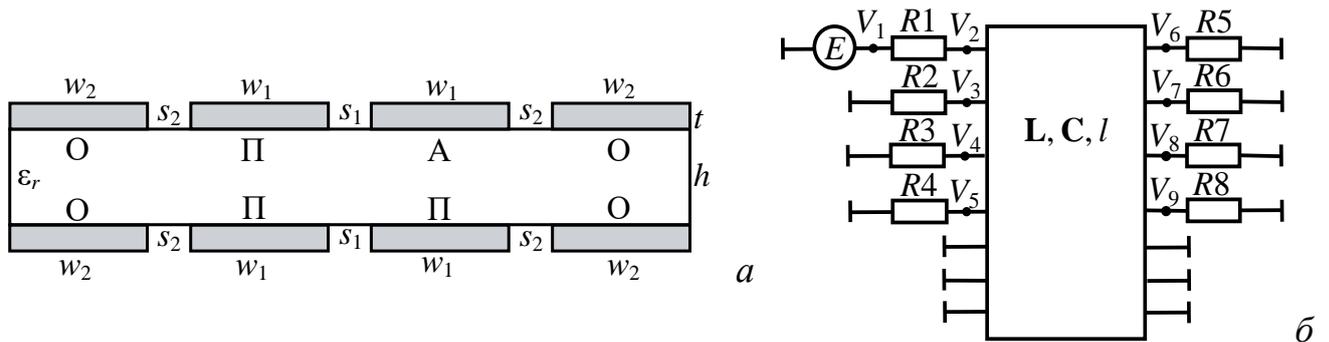


Рисунок 3.36 – Поперечное сечение (а) и схема для моделирования МФ (б)

Выполнено предварительное моделирование, подтверждающее разложение СКИ в таком МФ при произвольном наборе параметров:  $h=500$  мкм,  $w_1=1000$  мкм,  $w_2=500$  мкм,  $s_1=s_2=300$  мкм,  $t=70$  мкм и  $l=1$  м. В качестве входного воздействия использовался источник трапециевидной э.д.с. с амплитудой 2 В, временем нарастания 150 пс, плоской вершины – 200 пс и спада – 150 пс.

На рисунке 3.37 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Входной сигнал (СКИ) раскладывается на 7 импульсов (в соответствии с числом мод, по числу проводников, не считая одного опорного). Однако импульсы 2 и 3, а также 4 и 5, накладываются друг на друга. Это объясняется малой разностью погонных задержек мод ( $\tau_3-\tau_2=0,131$  нс/м и  $\tau_5-\tau_4=0,029$  нс/м), что приводит к увеличению амплитуды. Так, из-за наложения импульсов с погонными задержками  $\tau_3$  и  $\tau_2$  получается максимальная амплитуда импульсов на выходе МФ 0,425 В. Значения задержек и амплитуд приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды ( $U_i$ , В) импульсов

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$
4,282	4,668	4,799	5,472	5,501	5,991	6,540	0,0093	0,425	0,095	0,170	0,200		

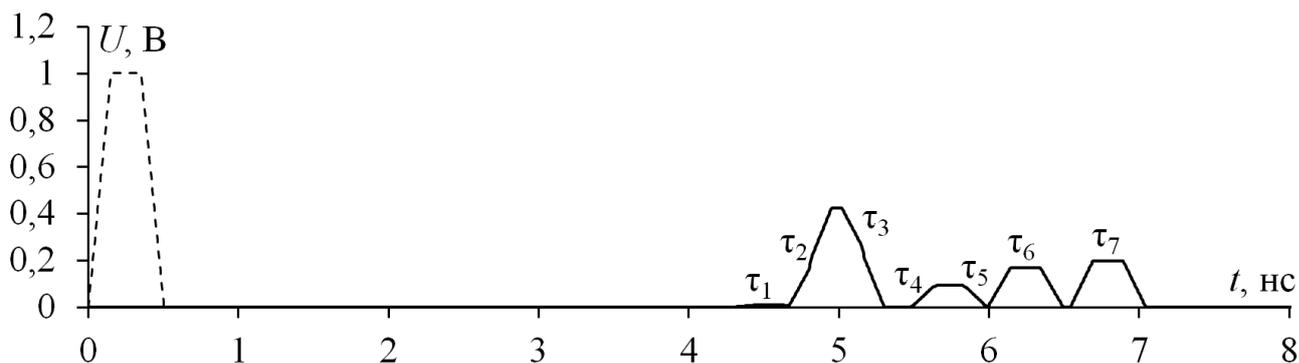


Рисунок 3.37 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

Таким образом, показана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями.

### 3.2.2 Оптимизация параметров модального фильтра

В пункте 3.1.2.3 показано, что с увеличением  $s$  разность погонных задержек мод растет, поэтому при моделировании принято  $s_2=3$  мм. При этом ширина опорных проводников на выходные характеристик влияет не значительно, поэтому принято  $w_2=500$  мкм. Также, при таких значениях  $s_2$  и  $w_1$  отсутствуют импульсы, которые появляются из-за опорных проводников (например, для таблицы 3.18 и рисунка 3.37 это импульсы 1, 4 и 5). Также не сильно влияет и  $t$ , поэтому принято  $t=35$  мкм. Оптимизировались ширина активного и пассивного проводников ( $w_1$ ) от 500 до 2100 мкм и  $s_1$  от 100 до 1000 мкм при  $h=0,5; 1; 1,5; 2$  мм.

Рисунок 3.37 показал наложение импульсов при длительности импульса 500 пс. Поэтому для анализа влияния параметров она уменьшена до 150 пс (время нарастания, плоской вершины и спада по 50 пс).

Результаты моделирования при  $h=0,5$  мм приведены в таблице 3.19. Анализ  $\tau_i$  показывает близкие значения между  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , а также между  $\tau_4$  и  $\tau_5$ . С увеличением  $w_1$  и  $s_1$  разность задержек между импульсами 3 и 2, а также 7 и 6, становится меньше, а между импульсами 6 и 3 – больше. При  $s_1=0,1$  мм и  $w_1=0,535$  мм достигается выравнивание разностей погонных задержек мод для  $\tau_3-\tau_2$  и  $\tau_6-\tau_3$  (0,79 нс/м, рисунок 3.38a), а при  $w_1=0,920$  мм – близость разностей погонных задержек импульсов 3 и 2, 7 и 6, которые равны 0,778 и 0,750 нс/м

соответственно (рисунок 3.38б). Увеличение  $w_1$  в большей степени влияет на амплитуды импульсов 6 и 7, и в меньшей – 2 и 3. Так, для 6 и 7 они уменьшаются, а 2 и 3 – увеличиваются. С увеличением  $s_1$ , уменьшается  $U_3$  и увеличивается  $U_2$ , а  $U_6$  и  $U_7$  почти не изменяются. Из графиков видно, что с увеличением  $s_1$  все больше значений  $w_1$ , при которых амплитуды  $U_6$  и  $U_7$  выравнены.

Минимум амплитуды (0,209 В) достигается при  $w_1=1,7$  мм и  $s_1=1$  мм. При этом ослабление по отношению к половине э.д.с. равно 4,8 раза. Однако, разность погонных задержек мод 3 и 2, 7 и 6 мала (0,342 и 0,196 нс/м соответственно), что уменьшает ослабление, если увеличить длительность воздействующего СКИ. Так, при его длительности 500 пс импульсы 6 и 7 накладываются друг на друга, так что  $U_{\max}=0,404$  В. Формы напряжения на входе и выходе при длительностях 150 и 500 пс приведены на рисунке 3.39.

Результаты моделирования при  $h=2$  мм приведены в таблице 3.20. С увеличением  $h$  разность погонных задержек становится меньше для мод 3 и 2, 6 и 3, а больше для 7 и 6. Так, при  $h=0,5$  мм ( $w_1=0,5$  мм и  $s_1=0,5$  мм)  $\tau_3-\tau_2=0,8$  нс/м,  $\tau_6-\tau_3=0,79$  нс/м и  $\tau_7-\tau_6=0,59$  нс/м, а при  $h=2$  мм эти значения равны 0,177, 0,177 и 0,7 нс/м соответственно. При малых значениях  $w_1$ , за счет уменьшения разности задержек и слияния импульсов 6 и 3 максимальная амплитуда импульсов увеличивается до 0,469 В (рисунок 3.40). При  $s=0,1$  мм и  $w=2,1$  мм выравниваются разности погонных задержек мод 6 и 3, 3 и 2 (рисунок 3.41а), а при  $s_1=1$  мм и  $w_1=1,35$  мм – 7 и 6, 6 и 3 (рисунок 3.41б). С увеличением  $h$  амплитуда импульса 2 увеличивается до 0,118 В (при  $s=1$  мм и  $w_1=2,1$  мм). Также видно, что с увеличением  $h$  и  $s_1$  все больше значений  $w_1$ , при которых амплитуды уже трех (а не двух, как было при  $h=0,5$  мм) мод ( $U_3$ ,  $U_6$  и  $U_7$ ) стремятся к выравниванию. Так, при  $s_1=1$  мм и  $w_1=1,9$  мм выравнены амплитуды импульсов 3, 6 и 7 ( $U=0,245$  В) и максимизирована амплитуда импульса 2 ( $U_2=0,118$  В), а разности погонных задержек мод составляют  $\tau_3-\tau_2=0,356$  нс/м,  $\tau_7-\tau_6=0,545$  нс/м и  $\tau_6-\tau_3=0,676$  нс/м. Для этого случая формы напряжения на входе и выходе приведены на рисунке 3.42.

Таблица 3.19 – Зависимости  $\tau_i$ ,  $\Delta\tau$ , и  $U_i$  от  $w_1$  при разных  $s$  для  $h=0,5$  мм

$s$ , мм	$\tau_i$ : $\tau_1$ (-), $\tau_2$ (-), $\tau_3$ (- -), $\tau_4$ (- · -), $\tau_5$ (- - - -), $\tau_6$ (· ·), $\tau_7$ (- · · -)	$\Delta\tau$ : $\tau_3-\tau_2$ (-), $\tau_7-\tau_6$ (- -), $\tau_6-\tau_3$ (- -)	$U_i$ : $U_2$ (-), $U_3$ (- -), $U_6$ (- · -), $U_7$ (· ·)
0,1			
0,5			
1			

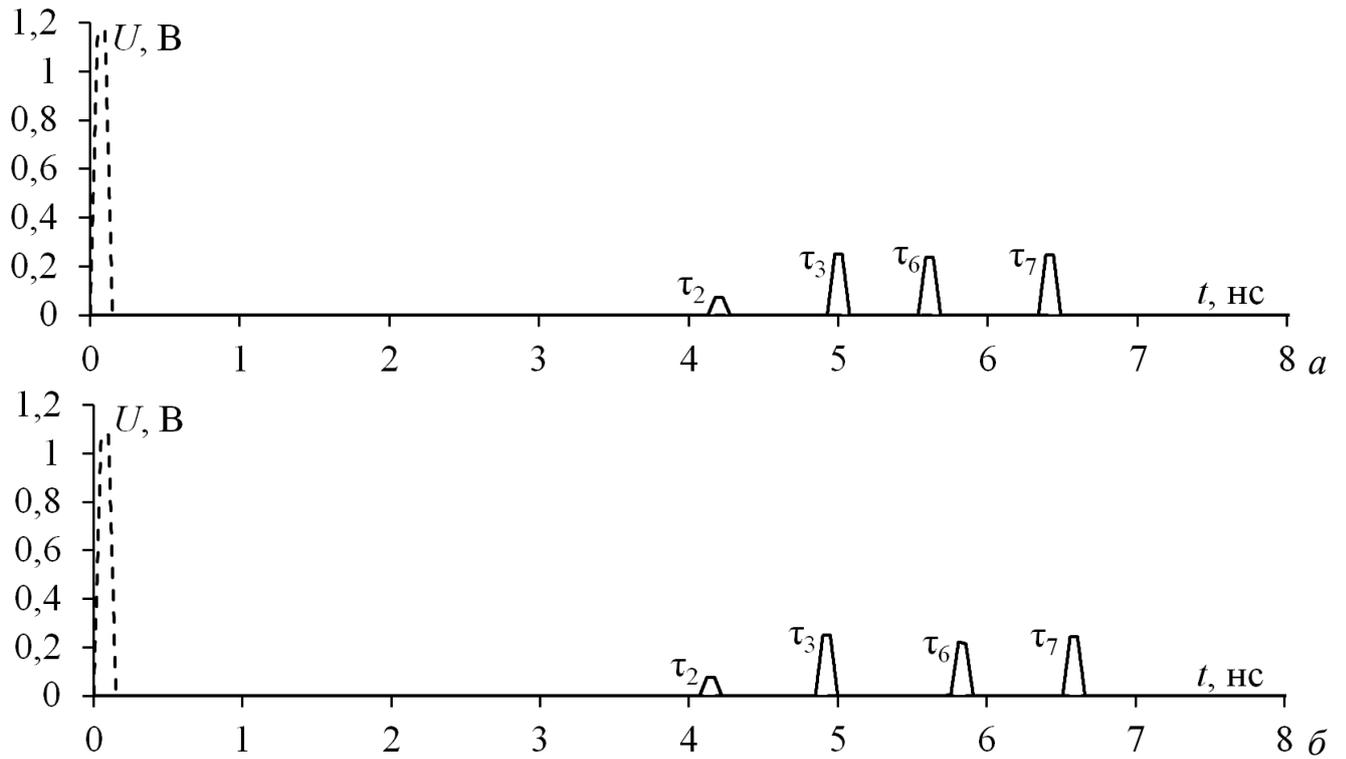


Рисунок 3.38 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $s_1=0,1$  мм,  $w_1=0,535$  (а) и  $w_1=0,920$  (б) мм

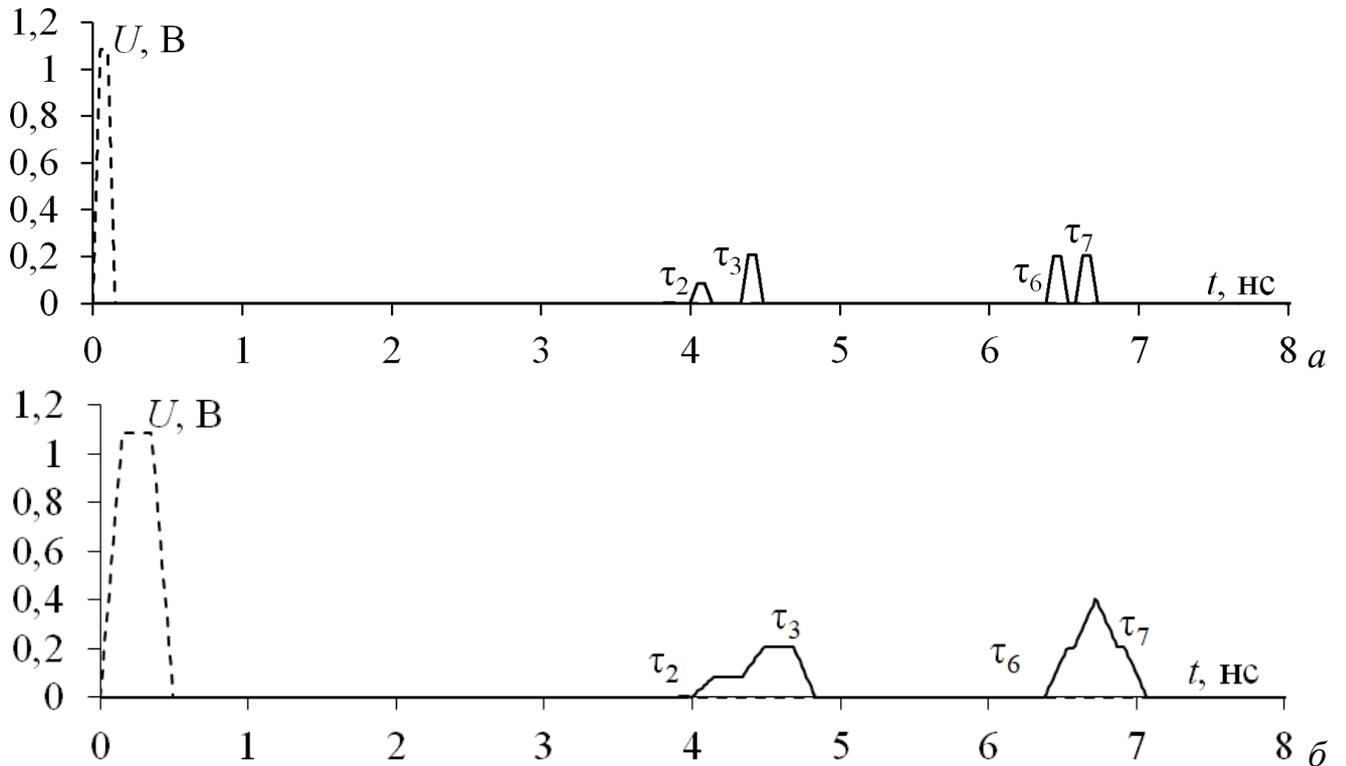


Рисунок 3.39 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $s_1=1$  мм,  $w_1=0,17$  мм и длительностях СКИ 150 (а) и 500 (б) пс

Таблица 3.20 – Зависимости  $\tau_i$ ,  $\Delta\tau$ , и  $U_i$  от  $w_1$  при разных  $s$ , для  $h=2$  мм

$s$ , мм	$\tau_i$ : $\tau_1$ (-), $\tau_2$ (-), $\tau_3$ (- -), $\tau_4$ (- - -), $\tau_5$ (- - - -), $\tau_6$ (· ·), $\tau_7$ (- · -)	$\Delta\tau$ : $\tau_3-\tau_2$ (-), $\tau_7-\tau_6$ (- -), $\tau_6-\tau_3$ (- -)	$U_i$ : $U_2$ (-), $U_3$ (- -), $U_6$ (- - -), $U_7$ (· ·)
0,1			
0,5			
1			

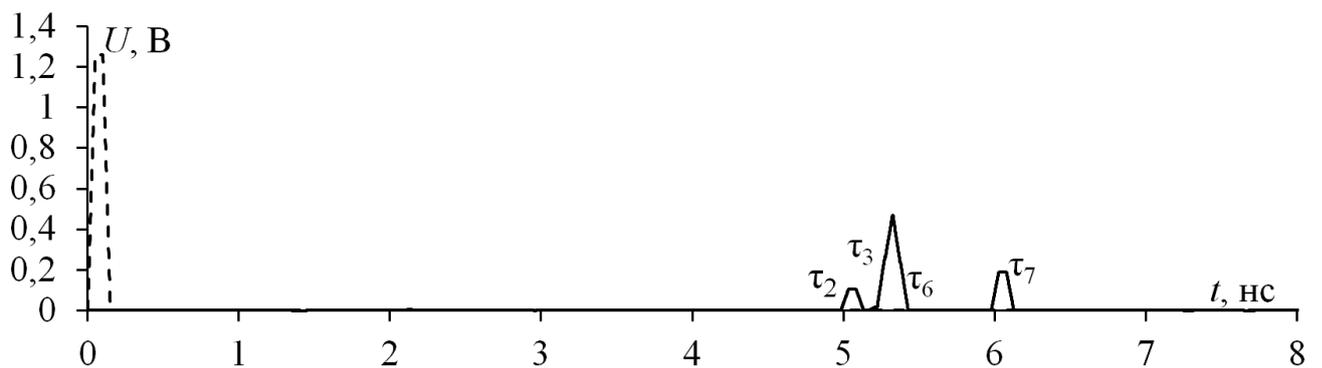


Рисунок 3.40 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $w_1=0,5$  мм и  $s_1=0,5$  мм

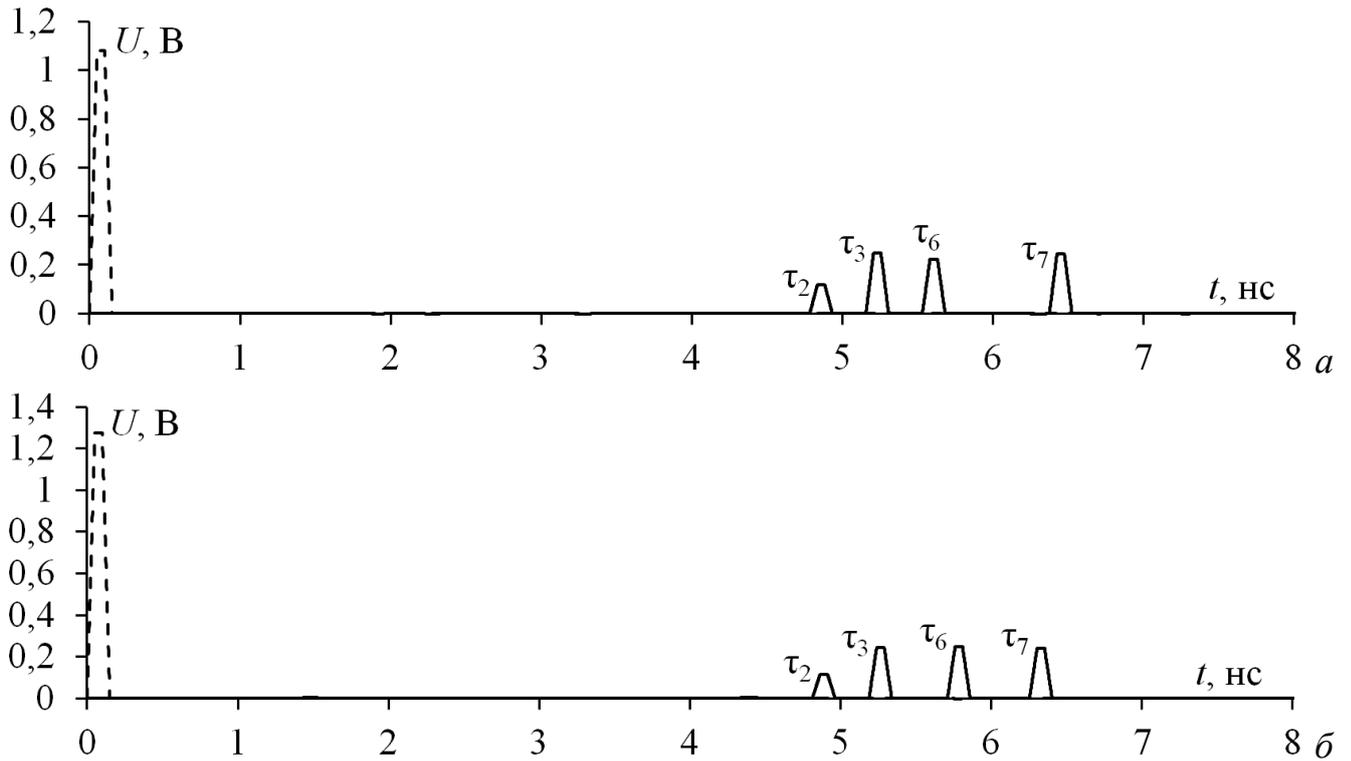


Рисунок 3.41 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ  
при  $w_1=2,1$  мм и  $s_1=0,1$  мм (а),  $w_1=1,35$  мм и  $s_1=1$  мм (б)

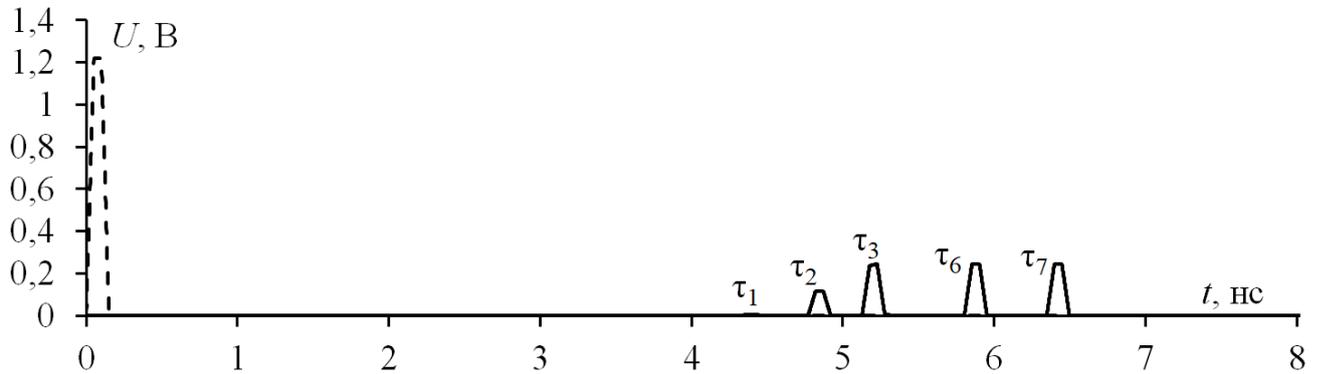


Рисунок 3.42 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ  
при  $w_1=1,9$  мм и  $s_1=1$  мм

Так, при  $h=0,5$  мм,  $s_1=0,09$  мм и  $w=0,95$  мм достигнуты: максимизация разности максимальной и минимальной задержек импульсов ( $\tau_2=4,07$  нс/м,  $\tau_7=6,52$  нс/м); выравнивание разностей задержек импульсов разложения ( $\tau_3-\tau_2=0,77$  нс/м,  $\tau_7-\tau_6=0,77$  нс/м,  $\tau_6-\tau_3=0,910$  нс/м); минимизация амплитуд импульсов разложения исходного СКИ ( $U_2=0,078$  В,  $U_3=0,249$  В,  $U_6=0,216$  В,  $U_7=0,239$  В, с ослаблением 4 раза по отношению к половине э.д.с.). При увеличении длительности входного СКИ до 500 пс ослабление остается то же. Формы

напряжения на входе и выходе МФ при длительности импульса 150 и 500 пс приведены на рисунке 3.43.

При указанном наборе параметров вычислен временной отклик при изменении граничных условий на концах всех пассивных проводников КЗ-ХХ, КЗ-ХХ, КЗ-ХХ и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ (рисунок 3.44). Примечательно, что при изменении граничных условий амплитуда всех импульсов равна 0,108 В. Однако появляются дополнительные импульсы (1,2,3) с большей амплитудой  $U_{\max}=0,132$  В, и ослабление составляет 10 раз.

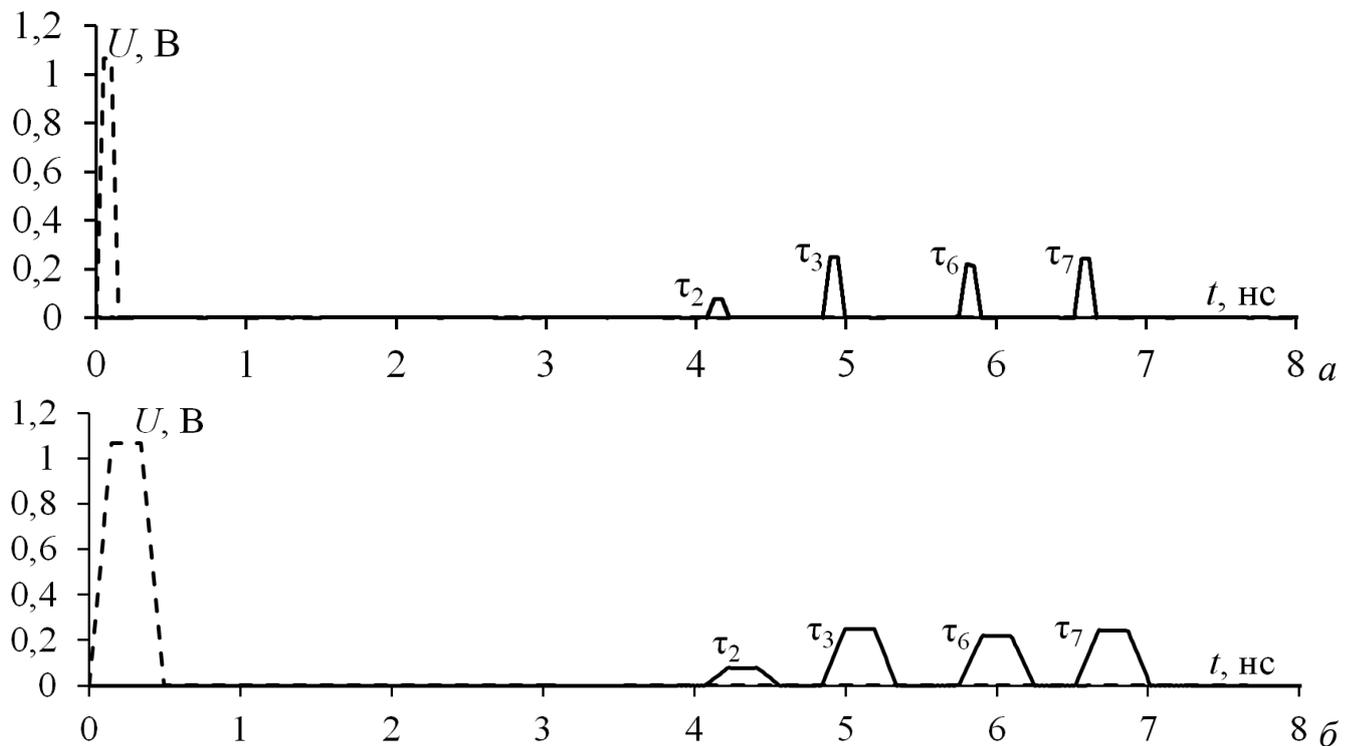


Рисунок 3.43 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $h=0,5$  мм,  $s_1=0,09$  мм и  $w_1=0,95$  мм и длительностях СКИ 150 (а) и 500 (б) пс

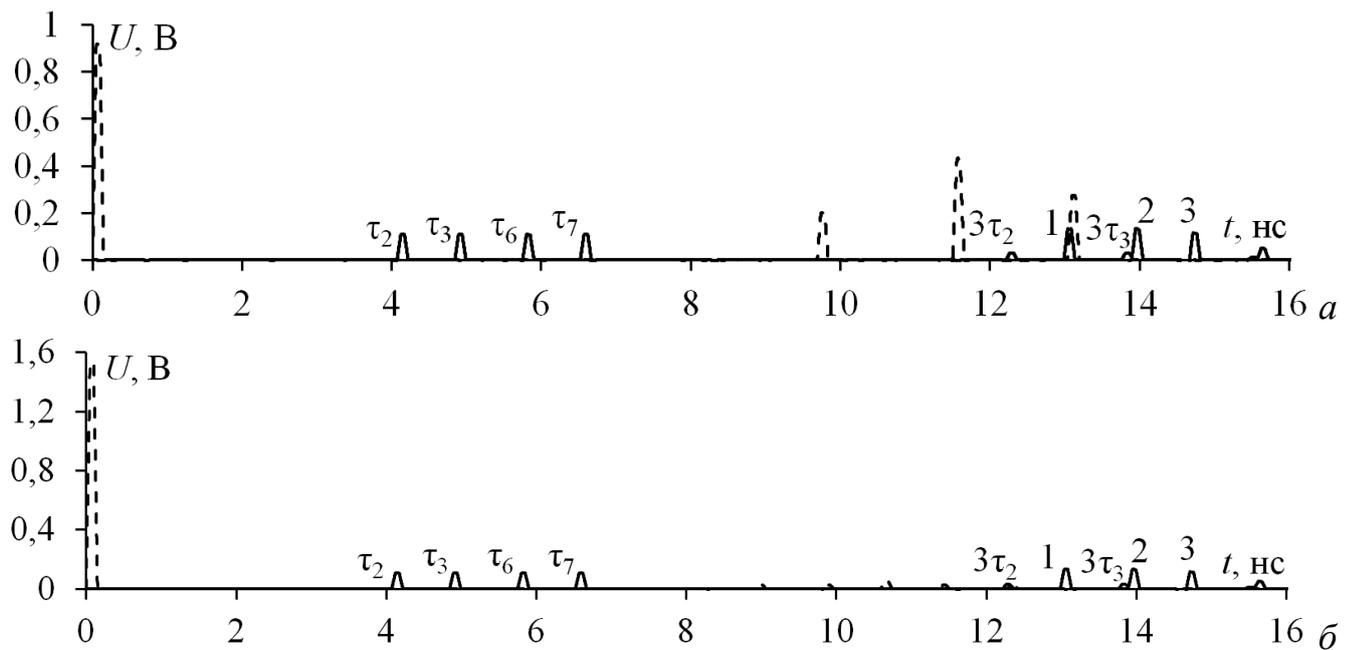


Рисунок 3.44 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при КЗ-ХХ, КЗ-ХХ, КЗ-ХХ (а) и ХХ-КЗ, ХХ-КХ, ХХ-КЗ (б)

Таким образом, выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями. Достигнуто следующее:

1. Максимизация разности максимальной и минимальной задержек импульсов ( $\tau_7 - \tau_2 = 2,45$  нс/м).

2. Выравнивание разностей задержек мод 3 и 2, 7 и 6 ( $\tau_3 - \tau_2 = 0,77$  нс/м,  $\tau_7 - \tau_6 = 0,77$  нс/м), а также максимизация для мод 6 и 3 ( $\tau_6 - \tau_3 = 0,910$  нс/м).

3. Минимизация амплитуд импульсов разложения исходного СКИ: в согласованном случае ослабление составило 4 раза, а при ХХ-КЗ на концах всех пассивных проводников – 10 раз.

### 3.2.3 Влияние удаления пассивных проводников на разложение импульса

Исследовано влияние удаления одного и двух пассивных проводников на разложение СКИ. Параметры поперечных сечений приведены в пункте 3.2.1. Поперечные сечения МФ без одного пассивного проводника (левого нижнего, правого нижнего, левого верхнего) и схема включения показаны на рисунке 3.45.

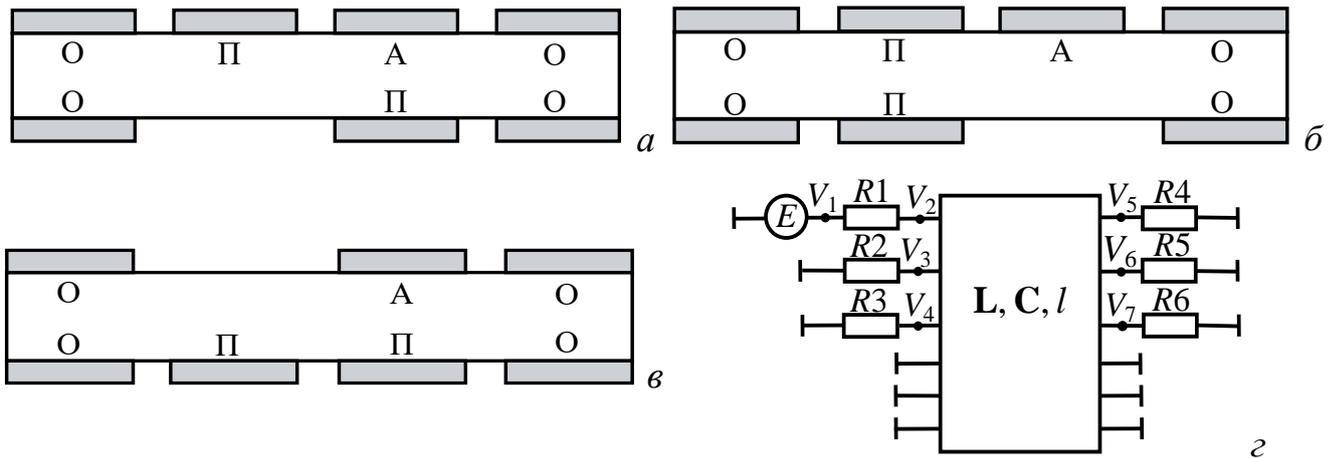


Рисунок 3.45 – Поперечные сечения МФ без левого нижнего (*a*), правого нижнего (*б*) и левого верхнего (*в*) пассивных проводников и схема включения МФ (*г*)

На рисунке 3.46 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ, при удалении одного пассивного проводника. Видно, что входной сигнал раскладывается на 6 импульсов мод. Как и со всеми проводниками, видно наложение импульсов мод 2 и 3, а также 4 и 5. Но значение  $\tau_3 - \tau_2$  больше, и на выходе МФ более четко видны импульсы 2 и 3. Удаление правого нижнего пассивного проводника увеличивает разность  $\tau_2$  и  $\tau_1$  до 0,5 нс/м, тогда как при удалении левого нижнего и левого верхнего значения  $\tau_2 - \tau_1$  почти одинаковы и равны 0,372 нс/м и 0,371 нс/м соответственно. Максимальная из амплитуд импульсов с удалением правого пассивного проводника почти удваивается (0,804 В), тогда как при удалении левого нижнего пассивного проводника становится даже в 1,16 раза меньше (0,365 В), чем без удаления. Значения задержек и амплитуд приведены в таблицах 3.21 и 3.22.

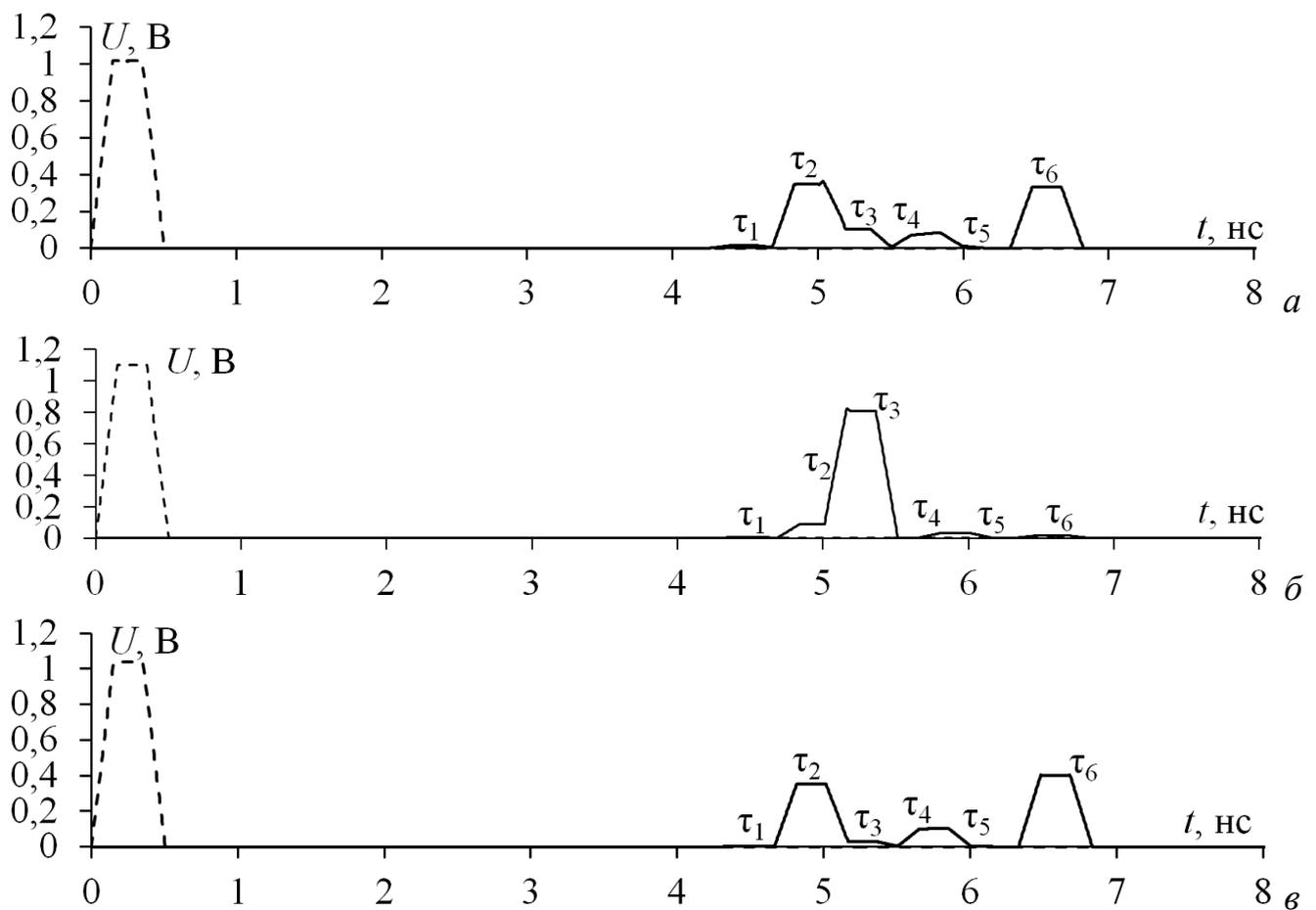


Рисунок 3.46 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ без левого (а) и правого нижних (б), левого верхнего (в) пассивных проводников

Таблица 3.21 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м)

МФ без пассивного проводника	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$
Левого нижнего	4,242	4,686	5,011	5,492	5,663	6,323
Правого нижнего	4,235	4,686	5,011	5,492	5,663	6,323
Левого верхнего	4,242	4,686	5,011	5,492	5,663	6,323

Таблица 3.22 – Амплитуды импульсов ( $U_i$  В)

МФ без пассивного проводника	$U_1$	$U_2+U_3$	$U_4+U_5$	$U_6$
Левого нижнего	0,0147	0,365	0,0848	0,333
Правого нижнего	0,0043	0,825	0,0324	0,0195
Левого верхнего	0,0068	0,362	0,0919	0,410

Актуально рассмотреть удаление двух пассивных проводников. Так, удаление двух нижних проводников обеспечивает только боковую связь между верхними проводниками, удаление двух левых проводников – лицевую связь между верхним и нижним, а диагональных (левого сверху и правого снизу) –

смешанную (торцово-лицевую) связь. Поперечные сечения МФ без двух пассивных проводников и схема показаны на рисунке 3.47.

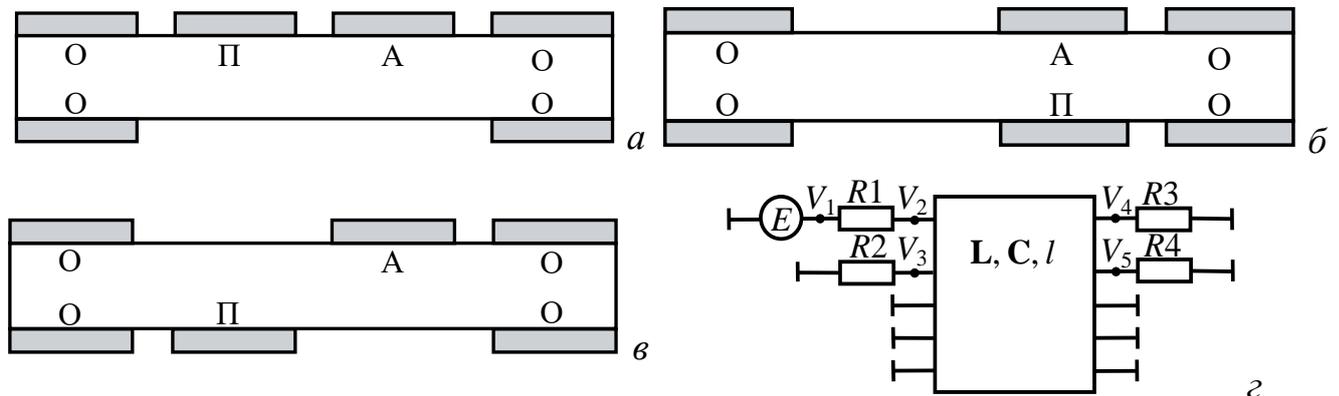


Рисунок 3.47 – Поперечные сечения МФ без двух нижних (а), левых (б), диагональных (в) пассивных проводников и схема включения МФ (г)

На рисунке 3.48 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ без двух пассивных проводников. При удалении нижних  $\tau_3 - \tau_2 = 0,206$  нс/м, так что из-за наложения импульсов мод 2 и 3 максимальная амплитуда импульсов на выходе МФ почти удваивается (0,843 В). При удалении диагональных на выходе МФ видно два импульса с амплитудами  $U_2 = 0,442$  В и  $U_3 = 0,430$  В, так что результирующая амплитуда лишь немногим больше, чем без удаления. Удаление левых проводников позволило увеличить разность погонных задержек мод 2 и 3, а также 4 и 5, что позволило увидеть импульсы 2 и 5. Однако, при этом уменьшилась разность погонных задержек мод 3 и 4, из-за чего они наложились. Максимальная амплитуда составила 0,410 В, так что результирующая амплитуда даже меньше, чем без удаления. Значения задержек и амплитуд приведены в таблице 3.23.

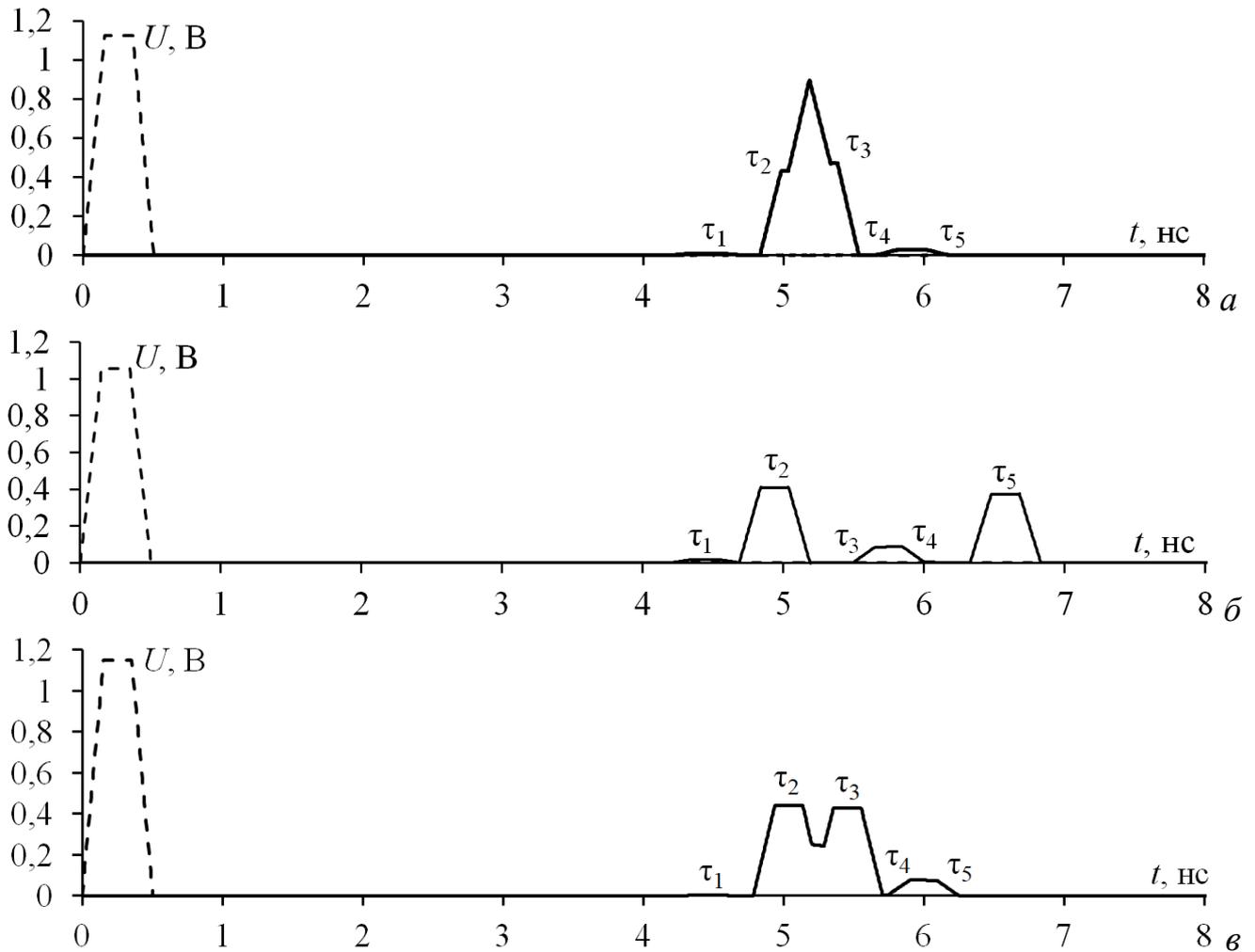


Рисунок 3.48 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

без двух нижних (а), левых (б) и диагональных (в) пассивных проводников

Таблица 3.23 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды ( $U_i$  В) импульсов

МФ без двух пассивных проводников	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
Нижних	4,196	4,832	5,038	5,652	5,685	0,008	0,843		0,027	
Левых	4,194	4,687	5,494	5,649	6,329	0,017	0,410	0,090		0,376
Диагональных	4,210	4,785	5,203	5,638	5,749	0,002	0,444	0,429		0,078

Выполнена оптимизация МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями без правого нижнего пассивного проводника, т.к. при этом достигнуто самое большое ослабление СКИ.

Оптимизировались ширина активного и пассивного проводников ( $w_1$ ) от 400 до 1000 мкм и  $s_1$  от 100 до 1000 мкм при  $h=0,5$  мм,  $t=35$  мкм,  $s_2=3000$  мкм и  $w_2=500$  мкм. При  $w_1=450$  мкм и  $s_1=110$  мкм достигаются максимизация разности

максимальной и минимальной задержек импульсов, близкие значения  $\tau_3 - \tau_2$  и  $\tau_6 - \tau_3$ , а также выравнивание амплитуд двух импульсов. Результаты оптимизации сведены в таблицу 3.24. Формы напряжения на входе и выходе при  $R_2=R_5=R_3=R_6=50$  Ом приведены на рисунке 3.49а. Вычисленные временные отклики при КЗ-XX, КЗ-XX и XX-КЗ, XX-КЗ показаны на рисунке 3.49б, в. Ослабление составляет 3,3 раза при  $R_2=R_5=R_3=R_6=50$  Ом и 4 раза при КЗ-XX, КЗ-XX.

Таблица 3.24 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды ( $U_i$  В) импульсов

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_3 - \tau_2$	$\tau_6 - \tau_3$	$U_2$	$U_3$	$U_6$
3,801	4,175	5,111	5,721	5,726	6,052	0,936	0,941	0,111	0,329	0,329

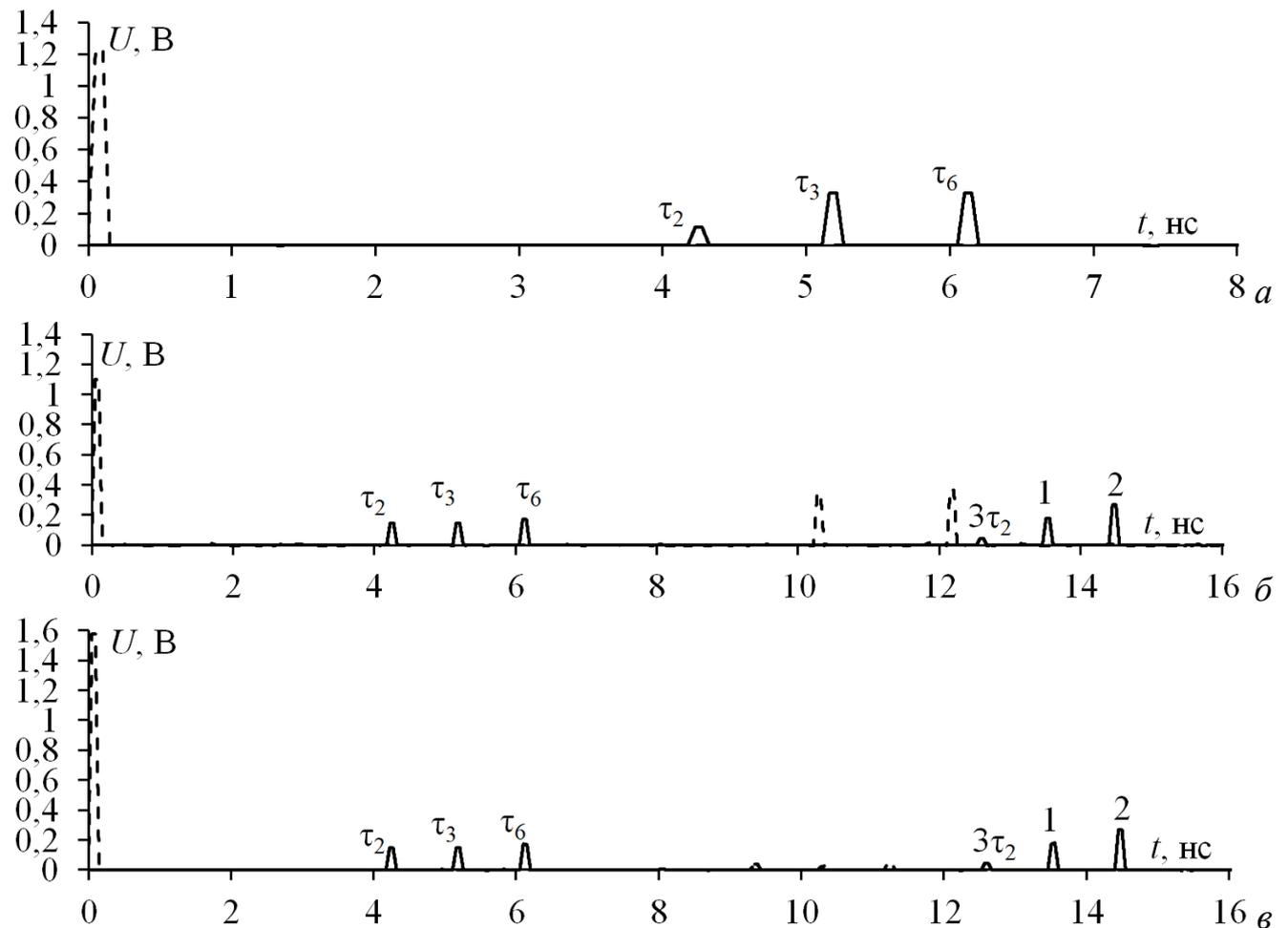


Рисунок 3.49 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $w_1=450$  мкм и  $s_1=110$  мкм при  $R_2=R_5=50$  Ом (а), КЗ-XX, КЗ-XX (б)

и XX-КЗ, XX-КЗ (в)

В результате, показана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями при удалении одного и двух пассивных проводников и выявлены случаи с таким же ослаблением, как без удаления. Выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями без левого нижнего пассивного проводника. Достигнуто следующее:

1. Максимизация разности максимальной и минимальной задержек импульсов ( $\tau_6 - \tau_3 = 0,942$  нс/м).
2. Близкие значения разностей задержек мод:  $\tau_3 - \tau_2 = 0,936$  нс/м и  $\tau_6 - \tau_3 = 0,941$  нс/м.
3. Выравнивание амплитуд импульсов 3 и 6 ( $U_3 = U_6 = 0,329$  В).

### 3.2.4 Дополнительные импульсы во временном отклике

Здесь рассмотрены дополнительные импульсы на выходе МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями, а также в структурах, полученных из него удалением одного и двух пассивных проводников.

Моделирование выполнялось с типовыми параметрами фольгированного стеклотекстолита:  $t=70$  мкм,  $h=500$  мкм,  $w_1=1000$  мкм,  $w_2=500$  мкм,  $s=300$  мкм при длине МФ  $l=5$  м. (Большая длина взята, чтобы исключить наложения дополнительных импульсов друг на друга, из-за чего сложно определить их задержки и возможные комбинации). На вход МФ подавался импульс длительностью 150 пс.

В таблице 3.25 сведены задержки импульсов мод, а в таблице 3.26 – комбинации и время дополнительных импульсов в МФ со всеми проводниками. На рисунке 3.50 показаны формы напряжения на выходе МФ. Из рисунка 3.50а видно, что нет дополнительных импульсов в интервале времени, соответствующем одному проходу по линии, что объясняется отсутствием отражений от начала линии. Однако, они уже есть в интервале, соответствующем тройному проходу. (На рисунках дополнительные импульсы обозначены как 1, 2, 3

и т.д.). Из рисунка 3.50б видно, что дополнительные импульсы имеют как положительную, так и отрицательную полярности. Амплитуда некоторых больше импульсов мод с тройным проходом по линии. Так, например, дополнительные импульсы 6 и 8 имеют отрицательную полярность и амплитуды 0,056 В и 0,054 В соответственно. Импульс 7 имеет положительную полярность и амплитуду 0,054 В, тогда как максимальная из амплитуд импульсов мод с тройным проходом по линии ( $3l\tau_2$ ) составляет 0,049 В. Некоторые дополнительные импульсы (например 1, 4 и 5) имеют столь малую амплитуду, что их не видно.

Таблица 3.25 – Задержки (нс) импульсов мод в МФ со всеми пассивными проводниками

$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$	$l\tau_4$	$l\tau_5$	$l\tau_6$	$l\tau_7$
21,411	23,339	23,993	27,359	27,503	29,951	32,701
$3l\tau_1$	$3l\tau_2$	$3l\tau_3$	$3l\tau_4$	$3l\tau_5$	$3l\tau_6$	$3l\tau_7$
64,234	70,017	71,980	82,077	82,508	89,855	98,104

Таблица 3.26 – Комбинации и задержки (нс) дополнительных импульсов 1–8 в МФ со всеми пассивным проводниками

1	2	3	4
$l(2\tau_1+\tau_2)$	$l(2\tau_1+\tau_3)$	$l(\tau_1+2\tau_3)$	$l(2\tau_2+\tau_3)$
66,161	66,815	69,397	70,671
5	6	7	8
$l(2\tau_3+\tau_2)$	$l(2\tau_4+\tau_6)$	$l(2\tau_6+\tau_4)$	$l(2\tau_5+\tau_7)$
71,325	84,670	87,262	87,707

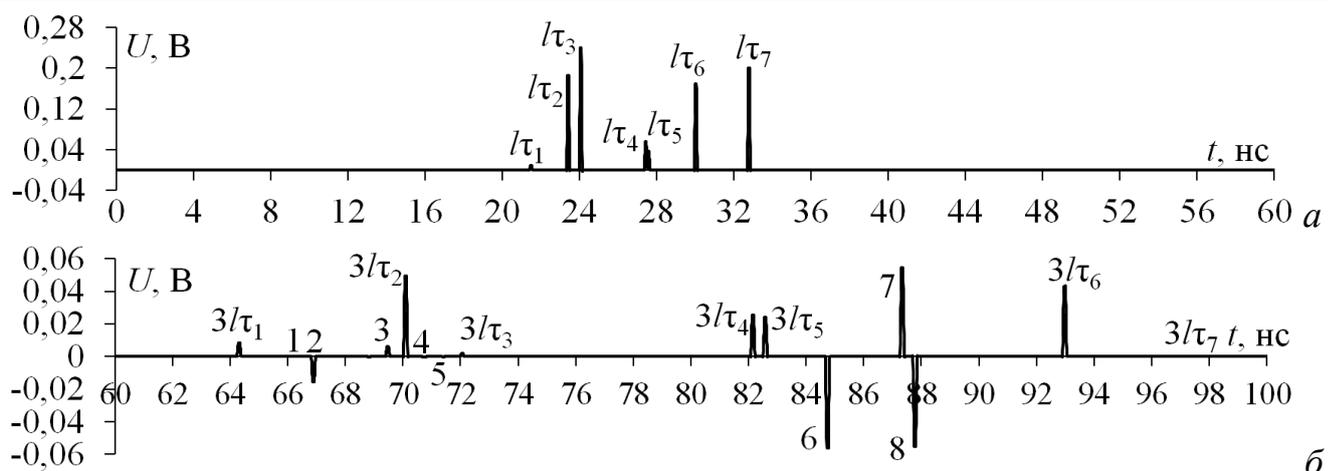


Рисунок 3.50 – Формы напряжения на выходе МФ со всеми пассивными проводниками для одного (а) и тройного (б) проходов импульсов по линии

В таблицу 3.27 сведены задержки импульсов мод, а в таблицу 3.28 – получившиеся комбинации и задержки дополнительных импульсов в МФ без одного пассивного проводника. На рисунке 3.51 показаны формы напряжения на выходе МФ.

При удалении одного пассивного проводника дополнительных импульсов стало больше. Так, в МФ без левого нижнего пассивного проводника их 44, правого нижнего – 41, а левого верхнего – 46. Однако дополнительных импульсов с большей амплитудой, чем у импульсов мод с тройным проходом по линии, стало меньше. Во всех трех МФ их по 2. В МФ без правого нижнего пассивного проводника амплитуда дополнительных импульсов минимальна, а левого верхнего – максимальна.

Анализ рисунка 3.51 показывает, что в МФ без левого нижнего пассивного проводника (рисунок 3.51б) наибольшие амплитуды у импульсов 43 и 39, правого нижнего (рисунок 3.51г) – 23 и 29, а левого верхнего (рисунок 3.51е) – 42 и 45. Из рисунка 3.51б видно, что импульсы 39 и 43 имеют отрицательную и положительную полярности соответственно. Амплитуды импульсов равны 0,099 В и 0,078 В, тогда как амплитуда второго импульса с тройным проходом по линии ( $3l\tau_2$ ) равна 0,069 В. Из рисунка 3.51г видно, что импульс 23 имеет положительную полярность и амплитуду 0,028 В, а импульс 29 имеет отрицательную полярность и амплитуду 0,055 В, тогда как амплитуда импульса 5 с тройным проходом по линии ( $3l\tau_5$ ) равна 0,026 В. Из рисунка 3.51е видно, что импульс 42 имеет отрицательную полярность и амплитуду 0,128 В, а импульс 45 имеет положительную полярность и амплитуду 0,105 В, тогда как амплитуда второго импульса с тройным проходом по линии ( $3l\tau_2$ ) равна 0,079 В.

Таблица 3.27 – Задержки (нс) импульсов мод в МФ без пассивного проводника

Задержки	Без левого нижнего	Без правого нижнего	Без левого верхнего
$l\tau_1$	21,209	21,174	21,209
$l\tau_2$	23,428	23,430	23,428
$l\tau_3$	25,056	25,056	25,056
$l\tau_4$	27,459	27,459	27,460
$l\tau_5$	28,314	28,315	28,314
$l\tau_6$	31,614	31,613	31,613
$3l\tau_1$	63,628	63,523	63,628
$3l\tau_2$	70,285	70,291	70,285
$3l\tau_3$	75,167	75,170	75,167
$3l\tau_4$	82,377	82,378	82,379
$3l\tau_5$	84,943	84,944	84,934
$3l\tau_6$	94,842	94,841	94,840

Таблица 3.28 – Комбинации и задержки (нс) дополнительных импульсов в МФ без пассивного проводника

№ импульса	Без левого нижнего		Без правого нижнего		Без левого верхнего	
	Комбинация	Задержка	Комбинация	Задержка	Комбинация	Задержка
1	$l(2\tau_1+\tau_2)$	65,84	$l(2\tau_1+\tau_2)$	65,78	$l(2\tau_1+\tau_2)$	65,85
2	$l(2\tau_1+\tau_3)$	67,47	$l(2\tau_1+\tau_3)$	67,40	$l(2\tau_1+\tau_3)$	67,47
3	$l(2\tau_2+\tau_1)$	68,06	$l(2\tau_2+\tau_1)$	68,03	$l(2\tau_2+\tau_1)$	68,06
4	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	69,69	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	69,66	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	69,69
5	$l(2\tau_1+\tau_4)$	69,88	$l(2\tau_1+\tau_5)$	70,66	$l(2\tau_1+\tau_4)$	69,88
6	$l(2\tau_1+\tau_5)$	70,73	$l(2\tau_3+\tau_1)$	71,28	$l(2\tau_1+\tau_5)$	70,73
7	$l(2\tau_3+\tau_1)$	71,32	$l(2\tau_2+\tau_3)$	71,92	$l(2\tau_3+\tau_1)$	71,32
8	$l(2\tau_2+\tau_3)$	71,91	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_5)$	72,92	$l(2\tau_2+\tau_3)$	71,91
9	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_4)$	72,10	$l(2\tau_3+\tau_2)$	73,54	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_4)$	72,10
10	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_5)$	72,95	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	73,69	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_5)$	72,95
11	$l(2\tau_3+\tau_2)$	73,54	$l(2\tau_1+\tau_6)$	73,96	$l(2\tau_3+\tau_2)$	73,54
12	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	73,72	$l(2\tau_2+\tau_4)$	74,32	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	73,72
13	$l(2\tau_1+\tau_6)$	74,03	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_5)$	74,54	$l(2\tau_1+\tau_6)$	74,03
14	$l(2\tau_2+\tau_4)$	74,31	$l(2\tau_2+\tau_5)$	75,17	$l(2\tau_2+\tau_4)$	74,31
15	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_5)$	74,58	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_4)$	75,94	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	74,58
16	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_4)$	75,94	$l(2\tau_4+\tau_1)$	76,09	$l(2\tau_2+\tau_5)$	75,17
17	$l(2\tau_4+\tau_1)$	76,13	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_6)$	76,22	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_4)$	75,94
18	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_6)$	76,25	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	76,80	$l(2\tau_4+\tau_1)$	76,13
19	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	76,80	$l(2\tau_3+\tau_4)$	77,57	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_6)$	76,25
20	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_5)$	76,98	$l(2\tau_5+\tau_1)$	77,80	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	76,80
21	$l(2\tau_3+\tau_4)$	77,57	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_6)$	74,84	$l(2\tau_3+\tau_4)$	77,57
22	$l(2\tau_5+\tau_1)$	77,84	$l(2\tau_4+\tau_2)$	78,35	$l(2\tau_5+\tau_1)$	77,84
23	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_6)$	77,88	$l(2\tau_3+\tau_5)$	78,43	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_6)$	77,88
24	$l(2\tau_4+\tau_2)$	78,34	$l(2\tau_4+\tau_3)$	79,97	$l(2\tau_4+\tau_2)$	78,34

Продолжение таблицы 3.28

25	$l(2\tau_2+\tau_6)$	78,47	$l(2\tau_5+\tau_2)$	80,05	$l(2\tau_3+\tau_5)$	78,42
26	$l(2\tau_4+\tau_3)$	79,97	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_6)$	80,10	$l(2\tau_2+\tau_6)$	78,47
27	$l(2\tau_5+\tau_2)$	80,06	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_6)$	80,25	$l(\tau_2+\tau_4+\tau_5)$	79,20
28	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_6)$	80,28	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_5)$	80,83	$l(2\tau_4+\tau_3)$	79,97
29	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_5)$	80,83	$l(2\tau_5+\tau_3)$	81,68	$l(2\tau_5+\tau_2)$	80,06
30	$l(\tau_1+\tau_5+\tau_6)$	81,14	$l(2\tau_3+\tau_6)$	81,73	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_6)$	80,10
31	$l(2\tau_5+\tau_3)$	81,68	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	82,50	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_6)$	80,28
32	$l(2\tau_3+\tau_6)$	81,72	$l(2\tau_4+\tau_5)$	83,23	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_5)$	80,83
33	$l(\tau_2+\tau_4+\tau_6)$	82,50	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	83,36	$l(\tau_1+\tau_5+\tau_6)$	81,14
34	$l(2\tau_4+\tau_5)$	83,23	$l(2\tau_5+\tau_4)$	84,10	$l(2\tau_5+\tau_3)$	81,68
35	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	83,37	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_6)$	84,13	$l(2\tau_3+\tau_6)$	81,72
36	$l(2\tau_5+\tau_4)$	84,09	$l(\tau_3+\tau_5+\tau_6)$	84,98	$l(\tau_2+\tau_4+\tau_6)$	82,50
37	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_6)$	84,13	$l(2\tau_4+\tau_6)$	86,53	$l(2\tau_4+\tau_5)$	83,23
38	$l(\tau_3+\tau_5+\tau_6)$	84,98	$l(\tau_4+\tau_5+\tau_6)$	87,39	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	83,35
39	$l(2\tau_4+\tau_6)$	86,53	$l(2\tau_5+\tau_6)$	88,24	$l(2\tau_5+\tau_4)$	84,09
40	$l(\tau_4+\tau_5+\tau_6)$	87,38	$l(2\tau_6+\tau_3)$	88,28	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_6)$	84,13
41	$l(2\tau_5+\tau_6)$	88,24	$l(2\tau_6+\tau_4)$	90,69	$l(\tau_3+\tau_5+\tau_6)$	84,98
42	$l(2\tau_6+\tau_3)$	88,28	—	—	$l(2\tau_4+\tau_6)$	86,53
43	$l(2\tau_6+\tau_4)$	90,69	—	—	$l(\tau_4+\tau_5+\tau_6)$	87,38
44	$l(2\tau_6+\tau_5)$	91,54	—	—	$l(2\tau_5+\tau_6)$	88,24
45	—	—	—	—	$l(2\tau_6+\tau_4)$	90,68
46	—	—	—	—	$l(2\tau_6+\tau_5)$	91,54

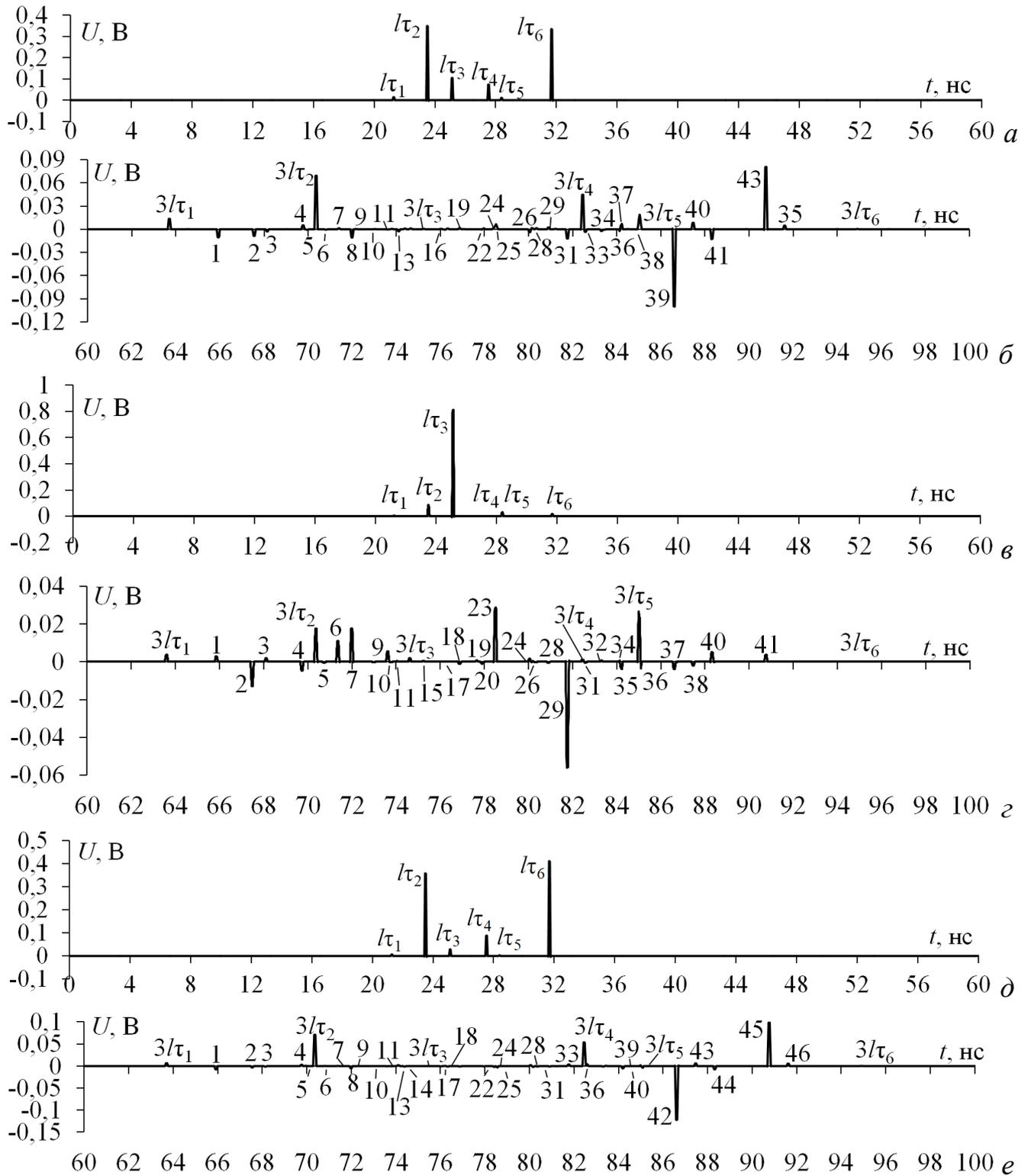


Рисунок 3.51 – Формы напряжения на выходе МФ без одного пассивного проводника: левого нижнего с одним (а) и тройным (б) проходами; правого нижнего с одним (в) и тройным (г) проходами; левого верхнего с одним (д) и тройным проходами (е)

На рисунках 3.52 и 3.53 показаны результаты моделирования временного отклика с дополнительными импульсами на выходе МФ с удалением двух

пассивных проводников. Так, в МФ без двух диагональных проводников их 12, а без нижних – 13. Одинарные и тройные погонные задержки, для каждого из МФ, приведены в таблицах 3.29 и 3.31. В таблицах 3.30 и 3.32 приведены получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов 1–12 и 1–13. Анализ рисунка 3.52 показывает, что в МФ без двух диагональных пассивных проводников (рисунок 3.52б) наибольшая амплитуда (0,097 В) у импульса 12, тогда как амплитуда импульса 5 с тройным проходом по линии ( $3l\tau_5$ ) равна 0,054 В. В МФ без двух нижних пассивных проводников дополнительных импульсов с большей амплитудой нет. Также, в таком МФ дополнительный импульс 13 с максимальной из остальных амплитудой имеет минимальную из разных случаев амплитуду (0,035 В).

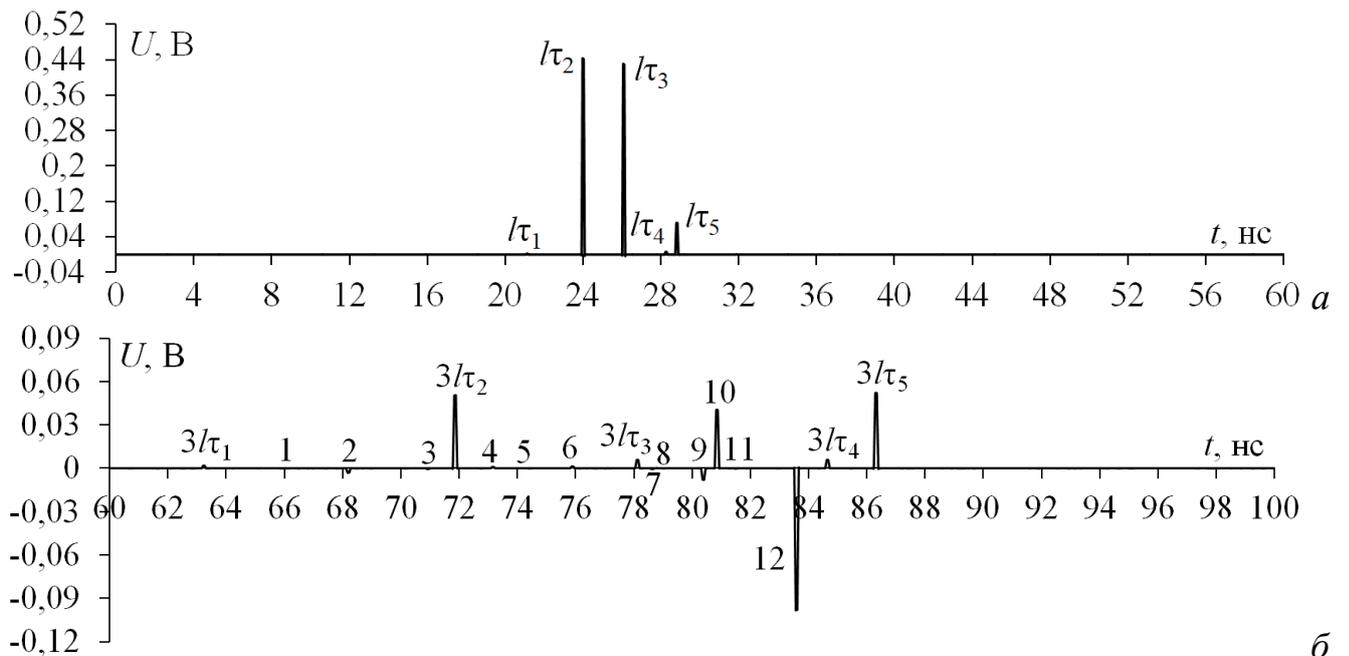


Рисунок 3.52 – Формы напряжения на выходе МФ без двух диагональных пассивных проводников для одного (а) и тройного (б) проходов импульсов

Таблица 3.29 – Одинарные и тройные погонные задержки мод (нс/м) в МФ без двух диагональных пассивных проводников

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$3\tau_1$	$3\tau_2$	$3\tau_3$	$3\tau_4$	$3\tau_5$
21,051	23,927	26,015	28,190	28,746	63,154	71,781	78,044	84,569	86,238

Таблица 3.30 – Время (нс) прихода дополнительных импульсов в МФ без двух диагональных пассивных проводников

1	2	3	4	5	6
$l(2\tau_1+\tau_2)$	$l(2\tau_1+\tau_3)$	$l(2\tau_1+\tau_5)$	$l(2\tau_3+\tau_1)$	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_5)$
66,030	68,118	70,849	73,081	73,869	75,812
7	8	9	10	11	12
$l(2\tau_5+\tau_1)$	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	$l(2\tau_4+\tau_2)$	$l(2\tau_3+\tau_5)$	$l(2\tau_5+\tau_2)$	$l(2\tau_5+\tau_3)$
78,543	78,688	80,307	80,776	81,419	83,507

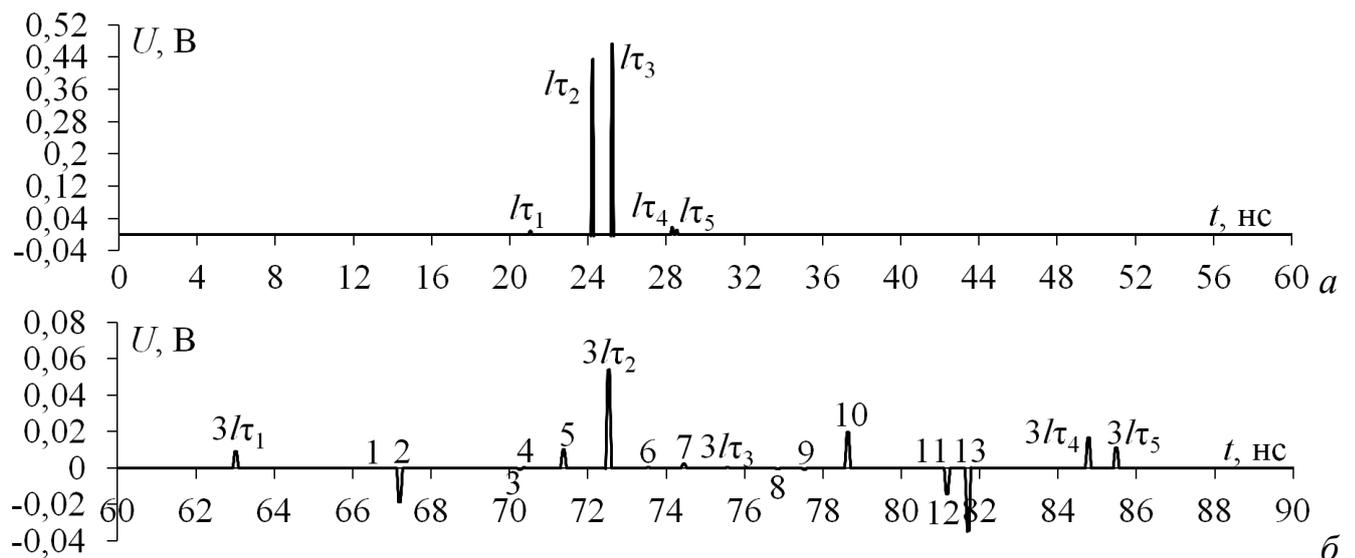


Рисунок 3.53 – Формы напряжения на выходе МФ без двух нижних

пассивных проводников для одинарного (а) и тройного (б) проходов импульсов

Таблица 3.31 – Одинарные и тройные погонные задержки (нс/м) мод в МФ без двух нижних пассивных проводников

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$3\tau_1$	$3\tau_2$	$3\tau_3$	$3\tau_4$	$3\tau_5$
20,981	24,152	25,163	28,233	28,470	62,944	72,456	75,488	84,699	85,409

Таблица 3.32 – Время (нс) прихода дополнительных импульсов в МФ без двух нижних пассивных проводников

1	2	3	4	5	6	7
$l(2\tau_1+\tau_2)$	$l(2\tau_1+\tau_3)$	$l(2\tau_1+\tau_4)$	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	$l(2\tau_3+\tau_1)$	$l(2\tau_2+\tau_3)$	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$
66,115	67,126	70,196	70,296	71,307	73,467	74,377
8	9	10	11	12	13	
$l(2\tau_2+\tau_5)$	$l(2\tau_4+\tau_1)$	$l(2\tau_3+\tau_4)$	$l(2\tau_4+\tau_2)$	$l(2\tau_5+\tau_2)$	$l(2\tau_4+\tau_3)$	
76,774	77,447	78,559	80,618	81,092	81,629	

В результате выявлено, что дополнительные импульсы есть во всех исследуемых структурах МФ. В зависимости от поперечного сечения, меняется не только общее количество дополнительных импульсов, но и количество дополнительных импульсов с амплитудой больше, чем у импульсов мод с

тройным проходом по линии. Так, в МФ со всеми проводниками, дополнительных импульсов меньше всего. Однако, в МФ без одного пассивного проводника количество дополнительных импульсов с большей амплитудой меньше. Также, их становится меньше с удалением двух пассивных проводников. Так, с удалением диагональных он один, а при удалении двух нижних их нет вовсе. Во всех рассмотренных МФ амплитуда дополнительных импульсов не превышает амплитуды основных импульсов мод. Минимальная амплитуда дополнительных импульсов наблюдается в МФ без двух нижних пассивных проводников, а максимальная – в МФ без левого верхнего.

### **3.2.5 Зеркально-симметричный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате**

Ранее исследован зеркально-симметричный МФ, однако реализация его исходной конфигурации требует 3-слойной ПП, что не удовлетворяет стандартному технологическому процессу изготовления многослойных ПП с четным числом слоев. Для решения данной проблемы разработан 4-слойный зеркально-симметричный МФ. Однако, его недостатками являются затрудненные монтаж радиоэлектронных компонентов и изготовление ПП из-за исполнения опорного проводника в виде отдельных слоев [75]. Поэтому актуальна более простая реализация зеркально-симметричного МФ.

Так, возможно реализовать зеркально-симметричный МФ с помощью модификации МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями. Это возможно за счет расположения двух опорных проводников симметрично относительно друг друга на верхнем и нижнем слоях диэлектрика между сигнальными проводниками. Поперечное сечение и эквивалентная схема зеркально-симметричного МФ на ДПП приведены на рисунке 3.54. Параметры поперечного сечения:  $s$  – разнос проводников,  $w_1$  – ширина опорных проводников,  $w_2$  – ширина активного и пассивных проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $t$  – толщина проводников,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

Активный проводник соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ , а на другом конце соединен с нагрузкой, представленной сопротивлением  $R5$ . Начала остальных сигнальных проводников (два нижних и один верхний), подключены к пластине (схемной земле) через резисторы  $R2$ ,  $R3$  и  $R4$ , а конец – через резисторы  $R6$ ,  $R7$  и  $R8$ . Опорные проводники (схемная земля) соединяются между собой по всей длине, как минимум, двумя металлизированными отверстиями. (Большее количество отверстий больше подавляет дополнительную моду.) Значения всех сопротивлений 50 Ом.

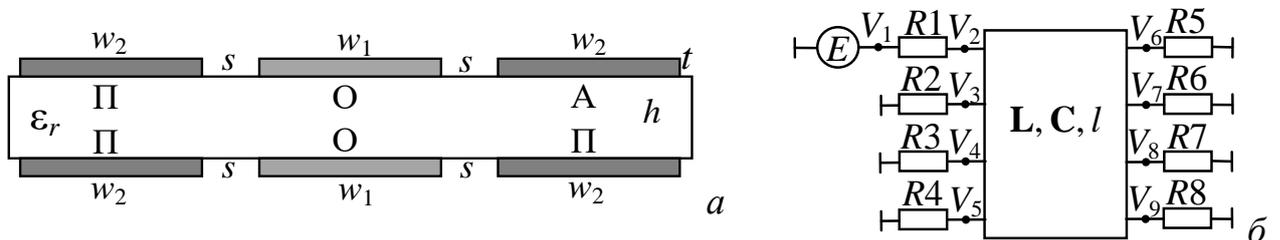


Рисунок 3.54 – Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) зеркально-симметричного МФ на ДПП

Выполнено моделирование такого МФ в диапазоне параметров:  $s=0,5; 1; 1,5$  мм;  $w=0,5; 1; 1,5$  мм;  $h=0,5; 1; 1,5$  мм,  $t=70$  мкм,  $\epsilon_r=4,5$  при  $l=1$  м. На вход МФ подавался импульс длительностью 150 пс.

В таблицу 3.33 сведены значения погонных задержек ( $\tau_i$ ) и амплитуд импульсов на выходе МФ ( $U_i$ ) при всех значениях параметров. Для наглядного представления влияния параметров на разложение СКИ, на рисунке 3.55 приведены формы напряжения на входе и выходе МФ, при  $h=0,5; 1; 1,5$  мм,  $w=0,5; 1,5$  мм и  $s=0,5; 1,5$  мм.

С увеличением  $h$  разность погонных задержек мод 2 и 1, 4 и 3 становится больше и меньше с увеличением  $s$  и  $w$ , а для мод 3 и 2 она уменьшается с увеличением  $h$  и увеличивается с ростом  $s$  и  $w$ . Анализ таблицы 3.33 и рисунка 3.55 показал, что во всем диапазоне параметров, кроме  $h=1,5$  мм,  $w=1$  мм и  $s=0,5$  мм, наблюдается наложение импульсов 3 и 4, что приводит к увеличению

амплитуды. Минимальная амплитуда наблюдается при  $h=1,5$  мм,  $w=1$  мм и  $s=0,5$  мм ( $U_1=0,219$  В,  $U_2=0,195$  В,  $U_3=0,250$  В и  $U_4=0,250$  В).

Таблица 3.33 – Вычисленные значения характеристик зеркально-симметричного МФ

$h$ , мм	$w$ , мм	$s$ , мм	$\tau_1$ , нС/м	$\tau_2$ , нС/м	$\tau_3$ , нС/м	$\tau_4$ , нС/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_4$ , В
0,5	1	0,5	4,319	4,698	6,188	6,246	0,190	0,154	0,428	
		1	4,123	4,505	6,227	6,268	0,163	0,120	0,467	
		1,5	4,010	4,372	6,239	6,268	0,418	0,102	0,467	
	1,5	0,5	4,261	4,597	6,348	6,395	0,193	0,160	0,422	
		1	4,072	4,406	6,380	6,415	0,167	0,125	0,424	
		1,5	3,963	4,278	6,390	6,416	0,152	0,106	0,423	
	2	0,5	4,226	4,526	6,454	6,493	0,195	0,163	0,382	
		1	4,037	4,328	6,481	6,512	0,170	0,128	0,384	
		1,5	3,931	4,199	6,489	6,513	0,156	0,111	0,383	
1	1	0,5	4,675	5,132	5,903	5,996	0,204	0,180	0,293	
		1	4,479	4,979	5,984	6,059	0,182	0,144	0,384	
		1,5	4,344	4,847	6,014	6,071	0,165	0,124	0,472	
	1,5	0,5	4,578	4,979	6,061	6,139	0,208	0,181	0,360	
		1	4,402	4,840	6,132	6,197	0,185	0,147	0,421	
		1,5	4,280	4,720	6,158	6,210	0,169	0,127	0,484	
	2	0,5	4,531	4,892	6,177	6,243	0,210	0,183	0,396	
		1	4,359	4,748	6,240	6,297	0,186	0,150	0,438	
		1,5	4,240	4,626	6,262	6,309	0,171	0,129	0,469	
1,5	1	0,5	4,880	5,368	5,861	5,745	0,219	0,195	0,250	0,250
		1	4,701	5,251	5,841	5,940	0,195	0,161	0,261	
		1,5	4,564	5,134	5,885	5,966	0,178	0,139	0,353	
	1,5	0,5	4,762	5,194	5,886	5,984	0,217	0,193	0,267	
		1	4,607	5,094	5,975	6,063	0,195	0,61	0,321	
		1,5	4,487	4,989	6,015	6,088	0,180	0,141	0,389	
	2	0,5	4,700	5,088	5,997	6,082	0,218	0,193	0,325	
		1	4,553	4,987	6,078	6,156	0,197	0,163	0,362	
		1,5	4,438	4,884	6,114	6,182	0,182	0,143	0,416	

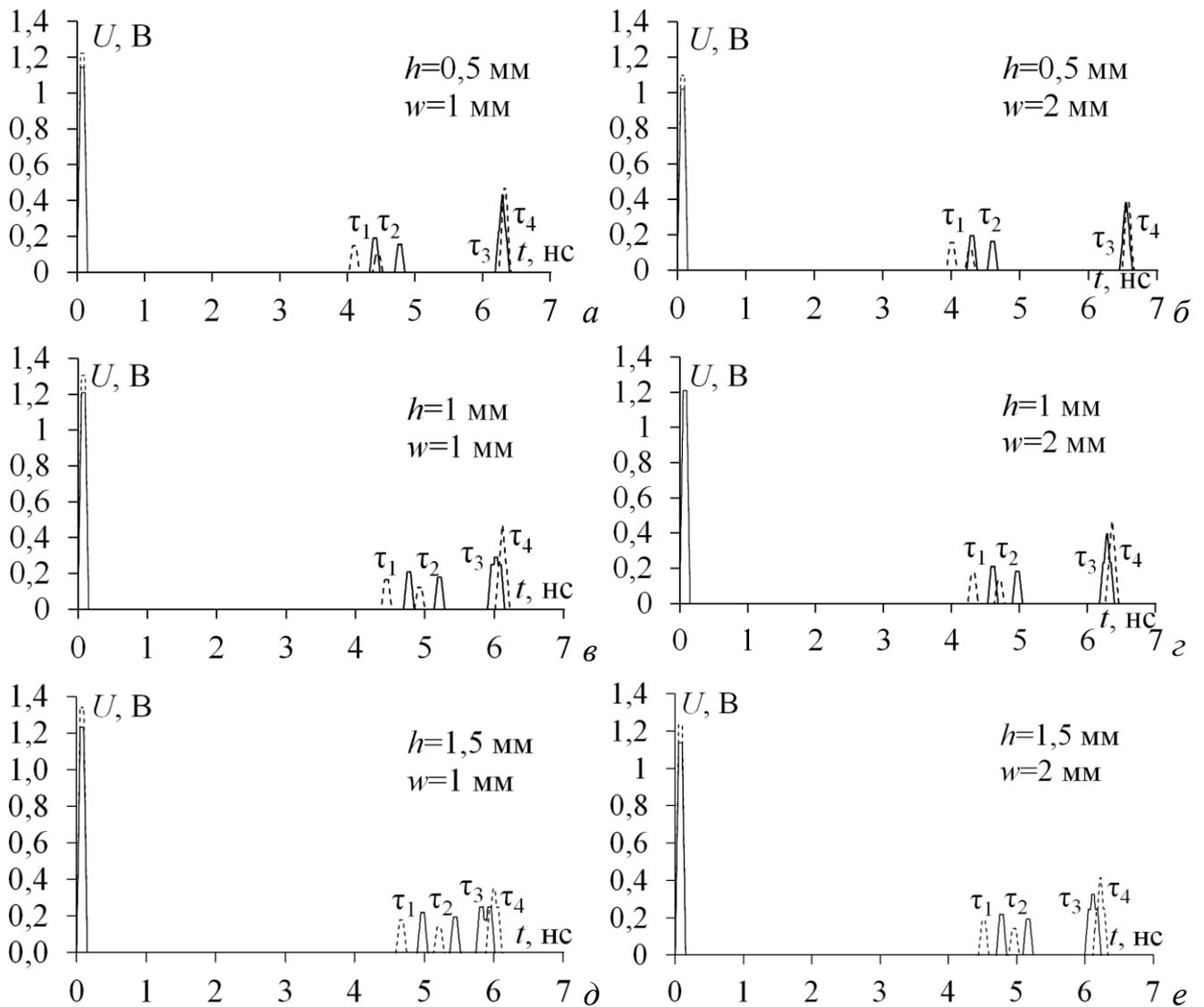


Рисунок 3.55 – Формы напряжения на входе зеркально-симметричного МФ

при  $s=0,5$  (—),  $1$  (---) мм и выходе МФ при  $s=0,5$  (—),  $1$  (---) мм

для  $h=0,5$  мм при  $w=0,5$  (а),  $2$  (б) мм, для  $h=1$  мм при  $w=0,5$  (в),  $2$  (г) мм

и  $h=1,5$  мм при  $w=0,5$  (д),  $2$  (е) мм

Достичь разложения импульсов 3 и 4 затруднительно из-за одинаковой связи между проводниками (которая обеспечивается равной шириной всех проводников), поэтому выполнено моделирование в диапазоне параметров при  $w_1=1000$  мкм.

В таблицу 3.34 сведены значения погонных задержек ( $\tau_i$ ) и амплитуд импульсов на выходе МФ ( $U_i$ ) при всех значениях параметров. Для наглядного представления влияния параметров на разложение СКИ, на рисунке 3.56 приведены формы напряжения на входе и выходе МФ, при  $h=0,5$ ;  $1$ ;  $1,5$  мм,

$w_2=0,5; 1,5$  мм и  $s=0,5; 1,5$  мм. Также наблюдается наложение импульсов 3 и 4 для всех  $w_2$  и  $s$  при  $h=0,5$  мм. Однако, с увеличением  $h$ ,  $w_2$  и уменьшением  $s$  значение  $\tau_3-\tau_4$  растет. Так, при  $h=1,5$  мм,  $w_2=2$  мм и  $s=1$  мм оно максимально ( $\tau_3-\tau_4=0,141$  нс/м), а  $\tau_2-\tau_1=0,587$  нс/м и  $\tau_3-\tau_2=0,619$  нс/м. При указанном наборе параметров амплитуды импульсов равны  $U_1=0,219$  В,  $U_2=0,195$  В,  $U_3=0,250$  В и  $U_4=0,250$  В.

Таблица 3.34 – Вычисленные значения характеристик зеркально-симметричного МФ при  $w_1=1000$  мкм

$h$ , мм	$w_2$ , мм	$s$ , мм	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$\tau_3$ , нс/м	$\tau_4$ , нс/м	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_4$ , В
0,5	1	0,5	4,330	4,699	6,188	6,246	0,191	0,156	0,432	
		1	4,137	4,505	6,227	6,268	0,162	0,120	0,467	
		1,5	4,025	4,373	6,240	6,268	0,149	0,101	0,466	
	1,5	0,5	4,257	4,684	6,340	6,403	0,195	0,156	0,368	
		1	4,069	4,488	6,375	6,420	0,169	0,121	0,422	
		1,5	4,354	3,963	6,387	6,419	0,154	0,103	0,423	
	2	0,5	4,207	4,677	6,441	6,507	0,199	0,156	0,323	
		1	4,022	4,478	6,473	6,521	0,173	0,121	0,383	
		1,5	3,919	4,344	6,485	6,519	0,159	0,103	0,383	
1	1	0,5	4,693	5,133	5,903	5,997	0,209	0,179	0,291	
		1	4,502	4,981	5,985	6,059	0,182	0,144	0,385	
		1,5	4,370	4,849	6,014	6,071	0,166	0,124	0,472	
	1,5	0,5	4,614	5,120	6,049	6,153	0,212	0,180	0,242	0,243
		1	4,424	4,962	6,124	6,206	0,187	0,145	0,336	
		1,5	4,296	4,830	6,152	6,216	0,171	0,125	0,429	
	2	0,5	4,556	5,113	6,156	6,267	0,215	0,181	0,231	0,233
		1	4,366	4,952	6,225	6,312	0,191	0,146	0,299	
		1,5	4,241	4,816	6,252	6,320	0,175	0,125	0,391	
1,5	1	0,5	4,899	5,369	5,745	5,862	0,219	0,195	0,250	0,250
		1	4,727	5,253	5,842	5,942	0,194	0,161	0,260	
		1,5	4,595	5,136	5,887	5,968	0,179	0,139	0,349	
	1,5	0,5	4,824	5,358	5,871	6,003	0,222	0,195	0,249	0,249
		1	4,649	5,237	5,964	6,075	0,199	0,162	0,250	0,250
		1,5	4,519	5,117	6,006	6,098	0,183	0,140	0,308	
	2	0,5	4,765	5,352	5,971	6,112	0,225	0,195	0,245	0,245
		1	4,589	5,227	6,060	6,178	0,203	0,162	0,245	0,246
		1,5	4,461	5,105	6,101	6,197	0,186	0,141	0,275	

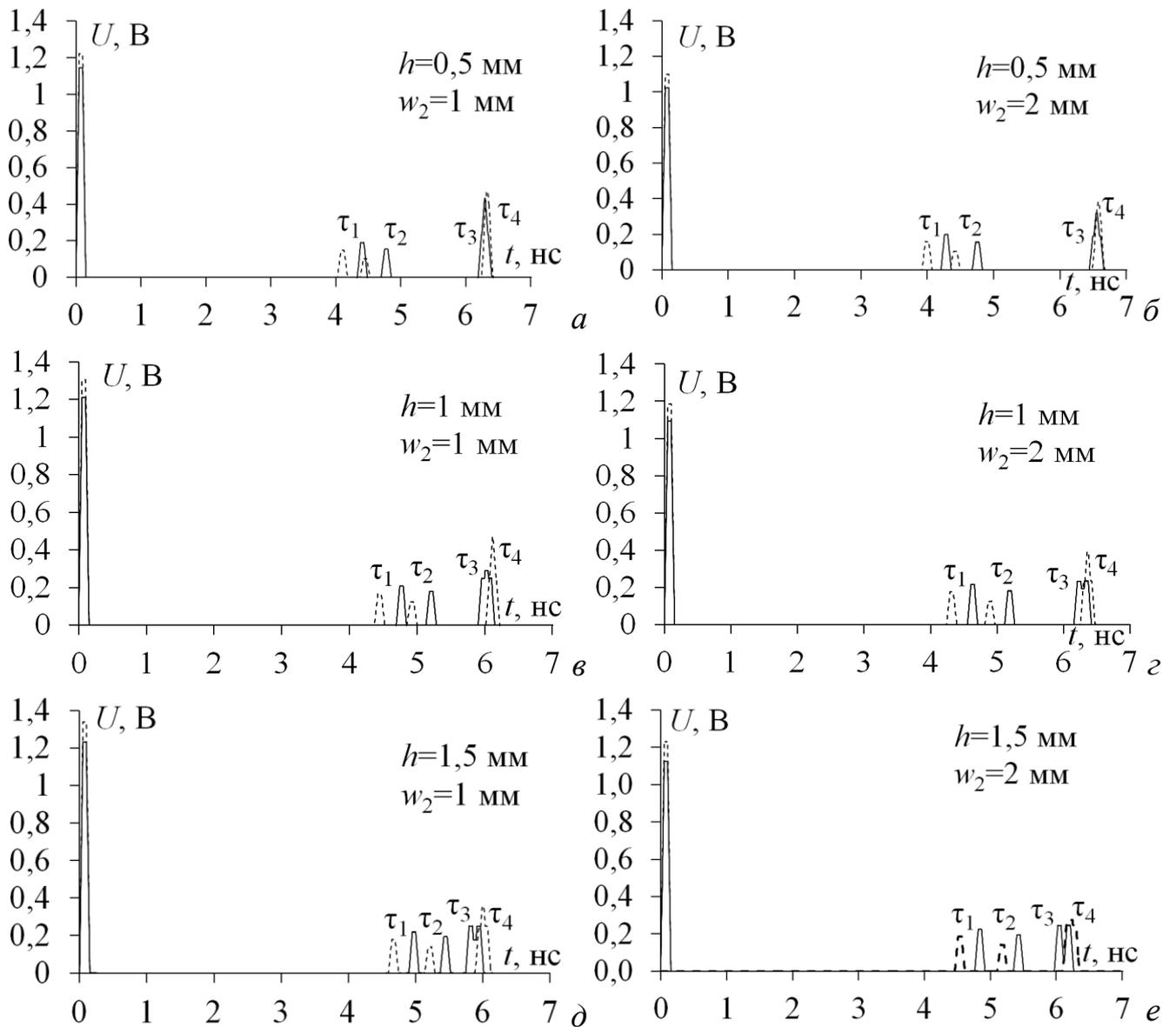


Рисунок 3.56 – Формы напряжения на входе зеркально-симметричного МФ

при  $s=0,5$  (—),  $1$  (---) мм и выходе МФ при  $s=0,5$  (—),  $1$  (---) мм

для  $h=0,5$  мм при  $w_2=0,5$  (а),  $2$  (б) мм, для  $h=1$  мм при  $w_2=0,5$  (в),  $2$  (г) мм

и  $h=1,5$  мм при  $w_2=0,5$  (д),  $2$  (е) мм

При  $w_1=1$  мм,  $w_2=3,6$  мм,  $s=0,3$  мм,  $h=2$  мм и  $t=70$  мкм достигнуто максимальное значение  $\tau_4-\tau_3=0,184$  нс/м, а  $\tau_2-\tau_1=0,644$  нс/м и  $\tau_3-\tau_2=0,489$  нс/м. Ослабление составляет 4,3 раза. В таблице 3.35 приведены вычисленные значения  $\tau_i$  и  $U_i$ , а формы напряжения на входе и выходе показаны на рисунке 3.57.

Таблица 3.35 – Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды ( $U_i$ , В) импульсов

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
4,857	5,501	5,991	6,175	0,242	0,222	0,231	0,235

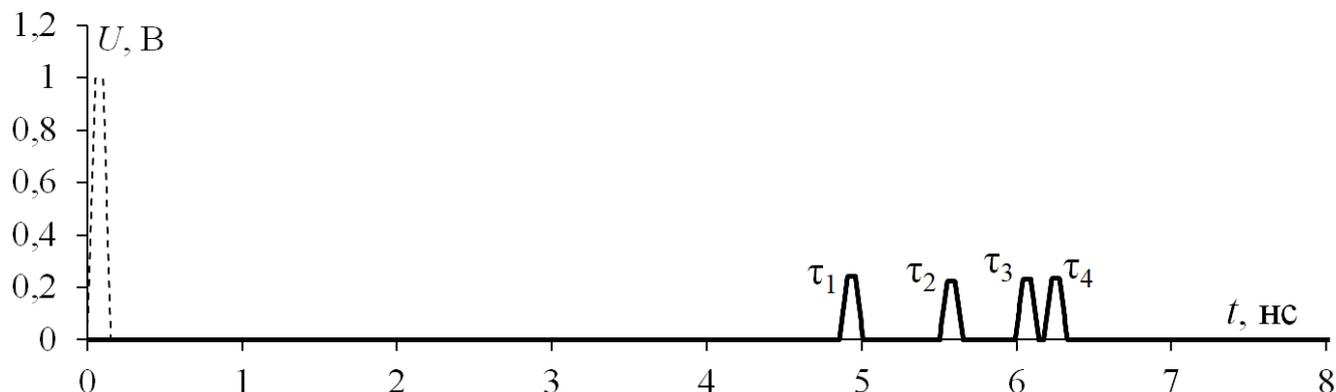


Рисунок 3.57 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при  $w_1=1$  мм,  $w_2=3,6$  мм,  $s=0,3$  мм,  $h=2$  мм и  $t=70$  мкм

При указанном наборе параметров вычислены временные отклики при КЗ-ХХ, КЗ-ХХ, КЗ-ХХ и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ на концах всех пассивных проводников. Формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунке 3.58. Как видно, ослабление оценивается амплитудой основных импульсов мод, а не амплитудой дополнительных импульсов как было, например, в МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями. Амплитуда всех 4 импульсов составляет 0,216 В.

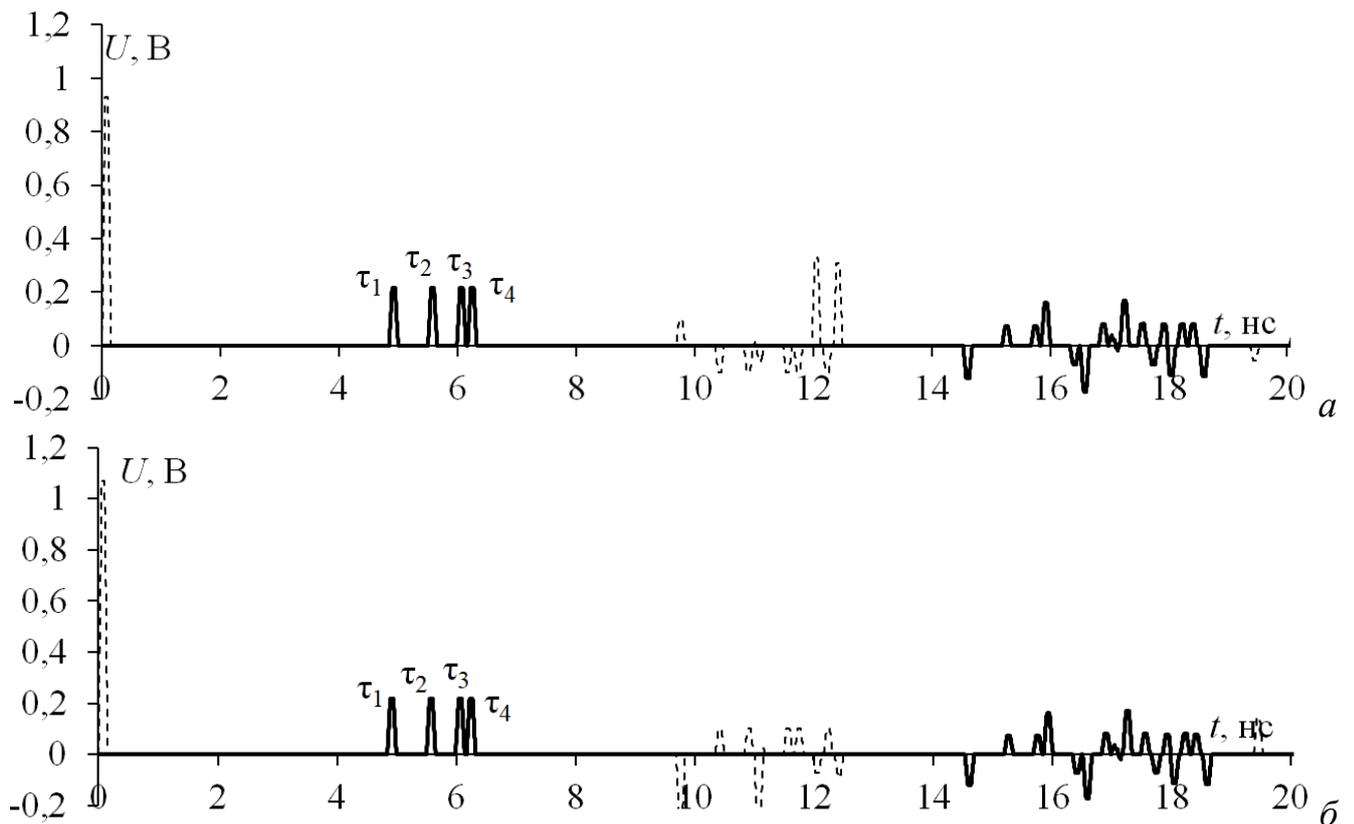


Рисунок 3.58 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ при КЗ-XX, КХ-XX, КЗ-XX (а) и XX-КЗ, XX-КЗ, XX-КЗ (б)

В итоге, показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричном МФ на ДПП. При равной ширине всех проводников импульсы 3 и 4 накладываются друг на друга, что приводит к увеличению амплитуды. Однако, возможно увеличить разность погонных задержек мод между этими импульсами за счет уменьшения  $w_1$  и  $s$ , а также увеличения  $w_2$  и  $h$ . Так, при  $w_1=1$  мм,  $w_2=3,6$  мм,  $s=0,3$  мм,  $h=2$  мм и  $t=70$  мкм  $\tau_2-\tau_1=0,644$  нс/м,  $\tau_3-\tau_2=0,489$  нс/м и  $\tau_4-\tau_3=0,184$  нс/м, а ослабление составляет 4 раза при нагрузках на концах всех проводников по 50 Ом и 5 раз при XX-КЗ, XX-КЗ, XX-КЗ.

### 3.3 Заявка на изобретение

Здесь представлена заявка на изобретение по результатам исследования зеркально-симметричного МФ. Технический результат состоит в защите от СКИ при упрощении изготовления устройства и монтажа его компонентов. Он достигается за счет уменьшения количества проводящих и диэлектрических слоев

при размещении опорных проводников на верхнем и нижнем слоях подложки. В частности, вместо многослойной печатной платы, достаточно простая двухсторонняя. Кроме того, упрощается монтаж компонентов к опорным проводникам, поскольку они на внешних слоях. Наиболее близкой к заявляемому устройству является выбранная за прототип четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от СКИ. Её недостатком является нечетное количество проводящих слоев, что не соответствует стандартному технологическому процессу изготовления многослойных печатных плат.

Предлагается устройство, состоящее из шести в поперечном сечении прямоугольных проводников на диэлектрическом слое, причем первый и второй проводники расположены на одной его стороне, два дополнительных проводника расположены зеркально-симметрично относительно первого и второго проводников на обратной стороне диэлектрика, *отличающееся тем, что* опорные проводники выполняются симметрично относительно друг друга на верхнем и нижнем слоях диэлектрика между сигнальными проводниками и соединяются между собой по всей длине, как минимум, двумя металлизированными отверстиями, при этом значение длины проводников, умноженное на значение разности максимальной погонной задержки и наибольшей из остальных погонных задержек, не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада сверхкороткого импульса, подающегося между активным проводником на верхнем слое подложки и опорным проводником.

На рисунке 3.59а приведена эквивалентная схема, моделируемая для подтверждения реализуемости заявки. Линия состоит из четырех (не считая двух опорных) проводников длиной  $l=1$  м каждый, по два на каждой стороне диэлектрического слоя. Первый проводник линии на одном конце соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . На другом конце первый проводник линии соединен с нагрузкой, представленной сопротивлением  $R5$ . Начала остальных сигнальных проводников (два нижних и один верхний), подключены к пластине (схемной земле) через резисторы  $R2$ ,  $R3$  и  $R4$ , а концы – через резисторы  $R6$ ,  $R7$  и

R8. Опорные проводники (схемная земля) соединяются между собой по всей длине, как минимум, двумя металлизированными отверстиями. (Большее количество отверстий больше подавляет дополнительную моду.) Значения всех сопротивлений 50 Ом. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с параметрами: амплитуда э.д.с. – 2 В, нарастание – 50 пс, плоская вершина – 50 пс, спад – 50 пс.

На рисунке 3.59б приведено поперечное сечение моделируемой структуры, когда два опорных проводника соединены (Проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный). Параметры поперечного сечения:  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $w_1$  – ширина опорных проводников,  $w_2$  – ширина активного и пассивных проводников,  $t$  – толщина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $s$  – расстояние между проводниками. Значения параметров:  $\epsilon_r=4,5$ ,  $w_1=1$  мм,  $w_2=3,6$  мм,  $s=0,3$  мм,  $h=2$  мм,  $t=70$  мм.

Значения параметров поперечного сечения и длины линии обеспечивают минимизацию амплитуды сигнала на выходе и выполнение условия

$$(\tau_4 - \tau_3)l \geq t_r + t_d + t_f, \quad (3.3)$$

где  $\tau_4 - \tau_3$  – разность максимальной погонной задержки мод линии и наибольшей из остальных,  $t_r$ ,  $t_d$  и  $t_f$  – длительности фронта, плоской вершины и спада импульса соответственно.

Для демонстрации достижения технического результата выполнено моделирование временного отклика на воздействие СКИ. Моделирование выполнено с помощью квазистатического подхода, реализованного в системе TALGAT. Детально вычисление временного отклика на воздействие импульса описано, например, в пункте 1.2.1 монографии [Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: Томский государственный университет, 2007. 152 с.].

Результаты моделирования во временной области, при подаче СКИ на активный проводник устройства, представлены на рисунке 3.59в. На выходе структуры (узел V6) наблюдаются 4 импульса мод с погонными задержками  $\tau_1=4,857$  нс/м,  $\tau_2=5,510$  нс/м,  $\tau_3=5,991$  нс/м и  $\tau_4=6,176$  нс/м. Значение

максимального напряжения на выходе структуры составляет 0,242 В, что в 4 раза меньше по отношению к половине э.д.с. В результате обеспечивается защита от СКИ при упрощении изготовления устройства. Таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлено заявленное устройство.

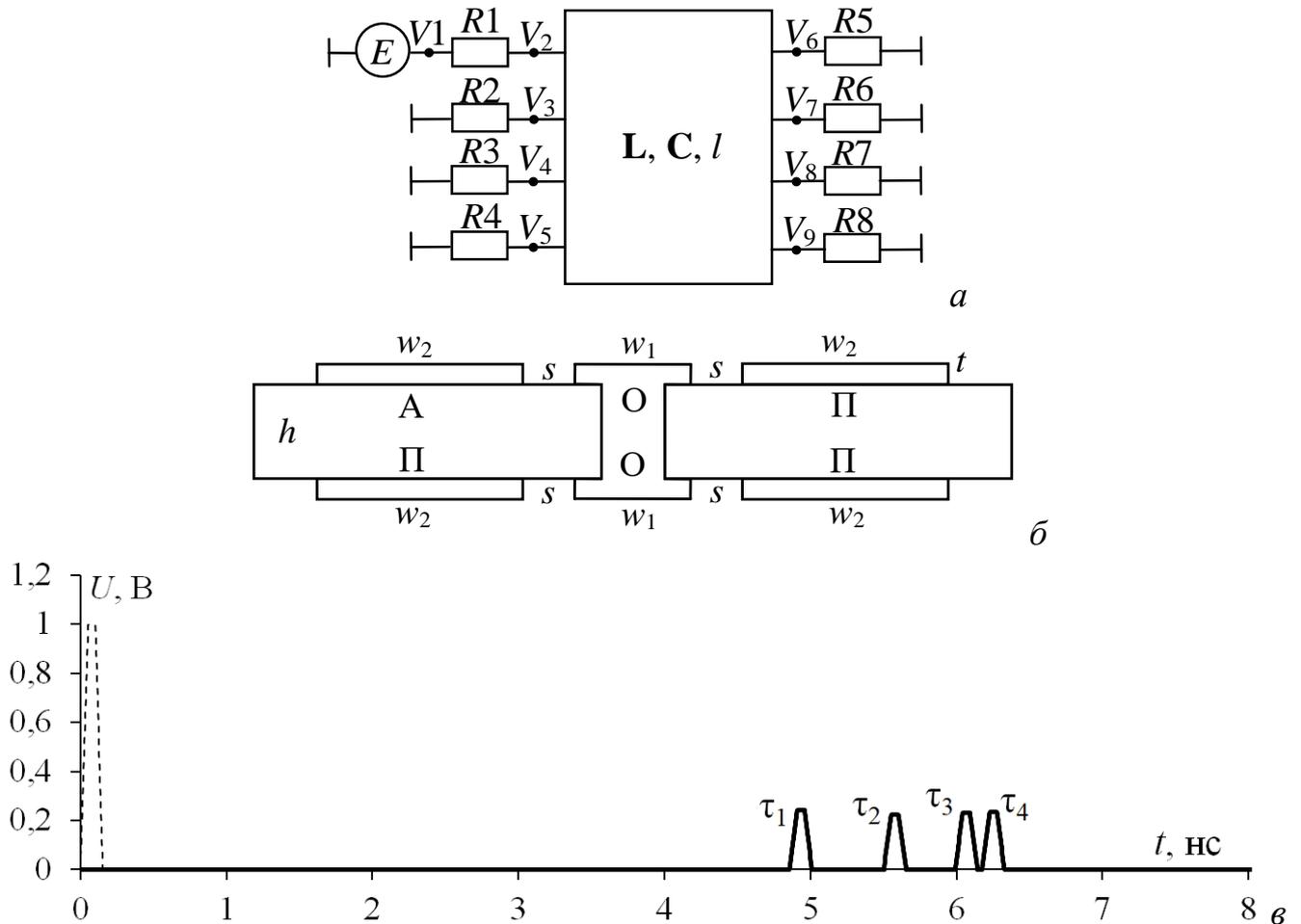


Рисунок 3.59 – Эквивалентная схема (а), поперечное сечение (б)

и формы напряжений на входе (- -) и выходе (-) при подаче СКИ на активный проводник устройства (в)

### 3.4 Сравнительный анализ модальных фильтров на двухсторонней печатной плате

Здесь представлены результаты сравнительного анализа структур МФ на ДПП с оптимальными параметрами поперечного сечения. Для сравнения приведены временные отклики (на воздействие в виде трапеции с э.д.с. 2 В) при

нагрузках на концах пассивного проводника по 50 Ом и ХХ-КЗ. Сравнительный анализ проводился по следующим критериям: массогабаритные показатели (плотность трассировки и минимальная длина, при которой возможно разложение помехи); эффективность ослабления помех (максимальная амплитуда напряжения на выходе и разность погонных задержек мод).

### **МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах**

Для такого МФ, при  $w_1=3150$  мкм,  $w_2=500$  мкм,  $s=2000$  мкм,  $h=500$  мкм и  $t=18$  мкм достигнуто выравнивание импульсов разложения с амплитудой 0,309 В, что соответствует ослаблению в 3,2 раза по отношению к половине э.д.с., а при ХХ-КЗ ослабление составляет 5,6 раза. Разность погонных задержек мод 5 и 2 составила 2,35 нс/м, что позволяет при  $l=21$  см разложить импульс общей длительностью 500 пс. Формы напряжения на входе и выходе МФ показаны на рисунке 3.60 (при  $l=1$  м).

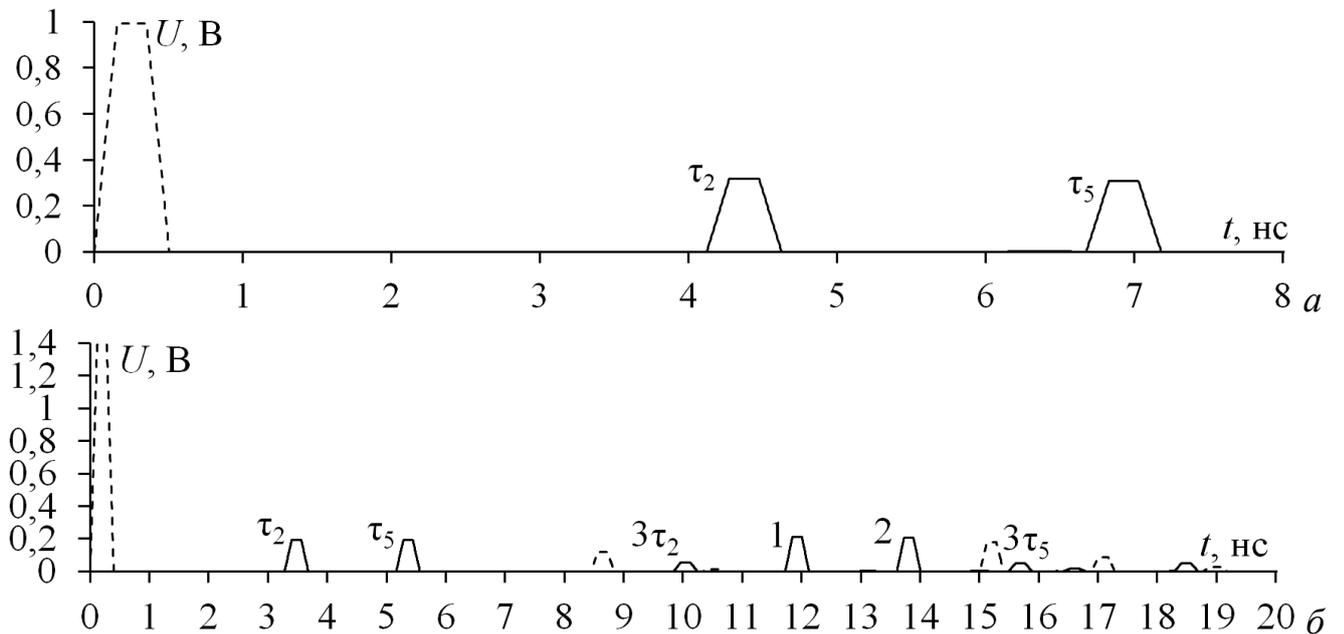


Рисунок 3.60 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при нагрузках на концах пассивного проводника 50 Ом (а) и ХХ-КЗ (б)

Из-за больших  $w_1$  и  $s$  данный МФ обладает средними показателями плотности трассировки, при этом большая  $\Delta t$  и равенство амплитуд разложенных импульсов обеспечивают высокие показатели помехоподавления СКИ. Для наилучшего ослабления СКИ необходим тонкий диэлектрик. За счет этого

снижается механическая прочность МФ, хотя и уменьшается масса. Также, возможно уменьшить массу МФ, не ухудшая ослабление СКИ, с помощью удаления одного или двух опорных проводников.

**МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины**

При  $w=3000$  мкм,  $s=2000$  мкм,  $h=500$  мкм и  $t=18$  мкм достигнуто выравнивание импульсов разложения с амплитудой 0,325 В и ослаблением в 3 раза по отношению к половине э.д.с., а при ХХ-КЗ – 6 раз. Разность погонных задержек мод 2 и 1 составила 2,424 нс/м, что позволяет при  $l=20$  см разложить импульс общей длительностью 500 пс. Формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунке 3.61.

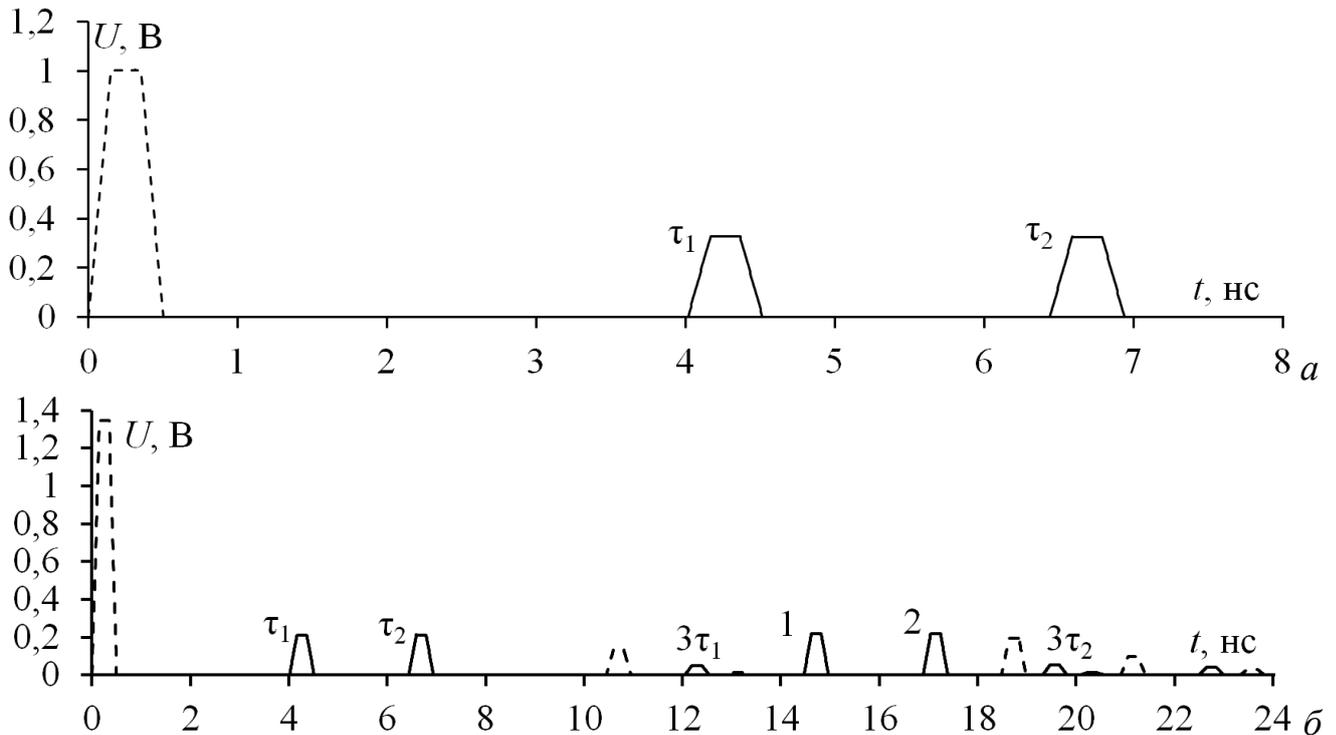


Рисунок 3.61 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при КЗ-ХХ (а) и ХХ-КЗ (б)

Соединение опорных проводников вдоль всей длины позволило увеличить  $\Delta\tau$ , так что длину МФ можно уменьшить до 20 см при СКИ длительностью 500 пс. Также увеличивается ослабление при ХХ-КЗ, однако ухудшается при нагрузках по 50 Ом. Плотность трассировки и механическая прочность остаются как и для предыдущего МФ.

### МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями

При  $h=500$  мкм,  $s_1=90$  мкм,  $s_2=3000$  мкм,  $w_2=500$  мкм,  $w_1=950$  мкм,  $t=35$  мкм и СКИ длительностью 150 пс достигнуто выравнивание разностей задержек импульсов разложения,  $\tau_3-\tau_2=0,77$  нс/м,  $\tau_7-\tau_6=0,77$  нс/м и  $\tau_6-\tau_3=0,910$  нс/м, а ослабление составляет 4 раза по отношению к половине э.д.с. при нагрузках на концах пассивных проводников по 50 Ом и 10 раз при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ. При увеличении длительности импульса входного СКИ до 500 пс ослабление остается то же, однако уменьшаются интервалы между импульсами, что не позволяет уменьшить длину МФ. Формы напряжения на входе и выходе МФ при СКИ длительностью 150 и 500 пс приведены на рисунке 3.62, а на рисунке 3.63 – при СКИ длительностью 150 пс и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ на концах пассивных проводников.

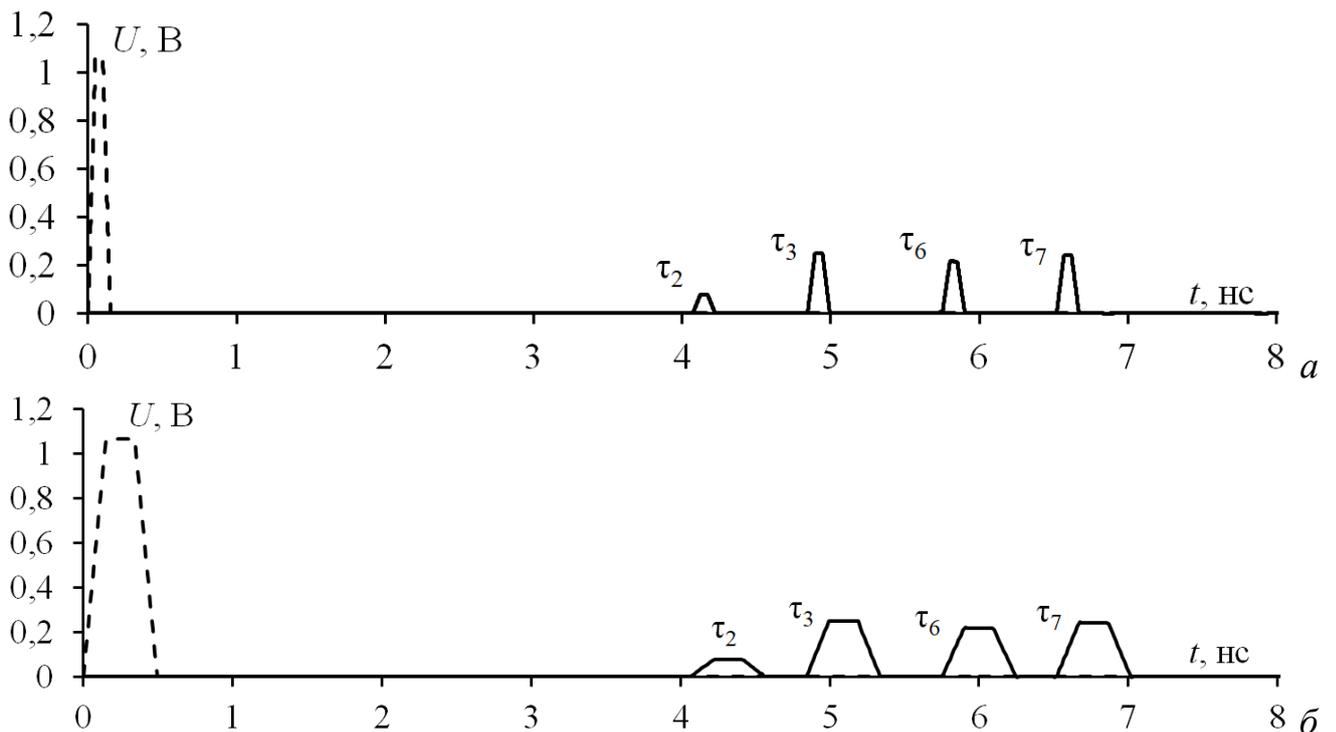


Рисунок 3.62 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

при длительностях СКИ 150 (а) и 500 (б) пс

и нагрузках на концах пассивных проводников по 50 Ом

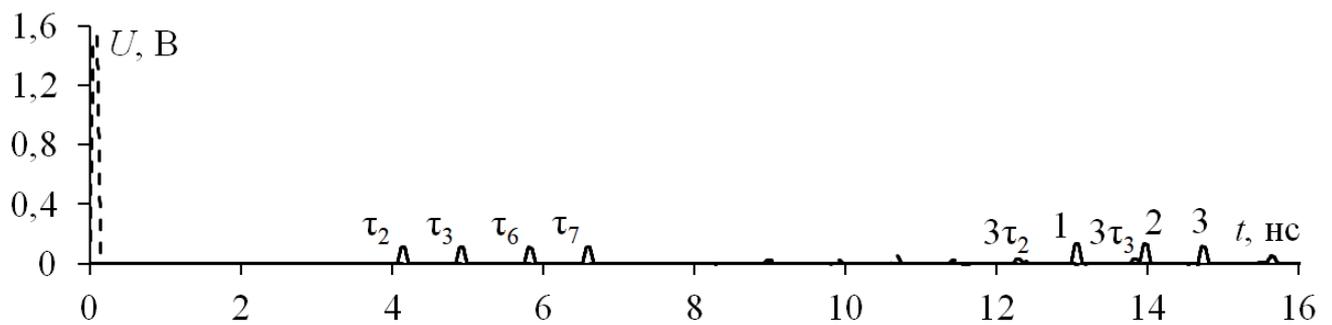


Рисунок 3.63 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ  
при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ

Таким образом, добавление двух пассивных проводников в МФ на ДПП позволило достичь большего ослабления СКИ, однако  $\Delta t$  при увеличении длительности входного СКИ уменьшается, что не позволяет уменьшить длину МФ. Для наилучшего ослабления СКИ необходим тонкий диэлектрик, что ухудшает механические свойства МФ. Из-за больших  $w_1$  и  $s_1$  и малого  $s_2$  данный МФ обладает средними показателями плотности трассировки. Кроме того, большое количество сигнальных проводников ограничивает область применения таких структур в реальных ДПП.

### Зеркально-симметричный МФ на ДПП

При  $w_1=1000$  мкм,  $w_2=3600$  мкм,  $s=300$  мкм,  $h=2$  мм,  $t=70$  мкм и СКИ длительностью 150 пс 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 составляет 4 раза при нагрузках на концах всех проводников по 50 Ом и 5 раз при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ. Так, ослабление больше чем в МФ на ДПП, но меньше чем в МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями. Однако, достичь такого ослабления можно при длительности СКИ 150 пс (при большей длительности СКИ ослабление уменьшается), из-за малого значения  $\Delta t$  не позволяет уменьшить длину МФ. Формы напряжения на входе и выходе МФ приведены на рисунке 3.64. За счет  $h=2$  мм зеркально-симметричный МФ имеет лучшие механические свойства. Также лучше и плотность трассировки. Однако хуже ослабление, т.к.  $\Delta t$  мало.

Таким образом, выполнен сравнительный анализ МФ на ДПП. Сравнение позволило выявить ряд достоинств и недостатков каждого из устройств по ряду признаков.

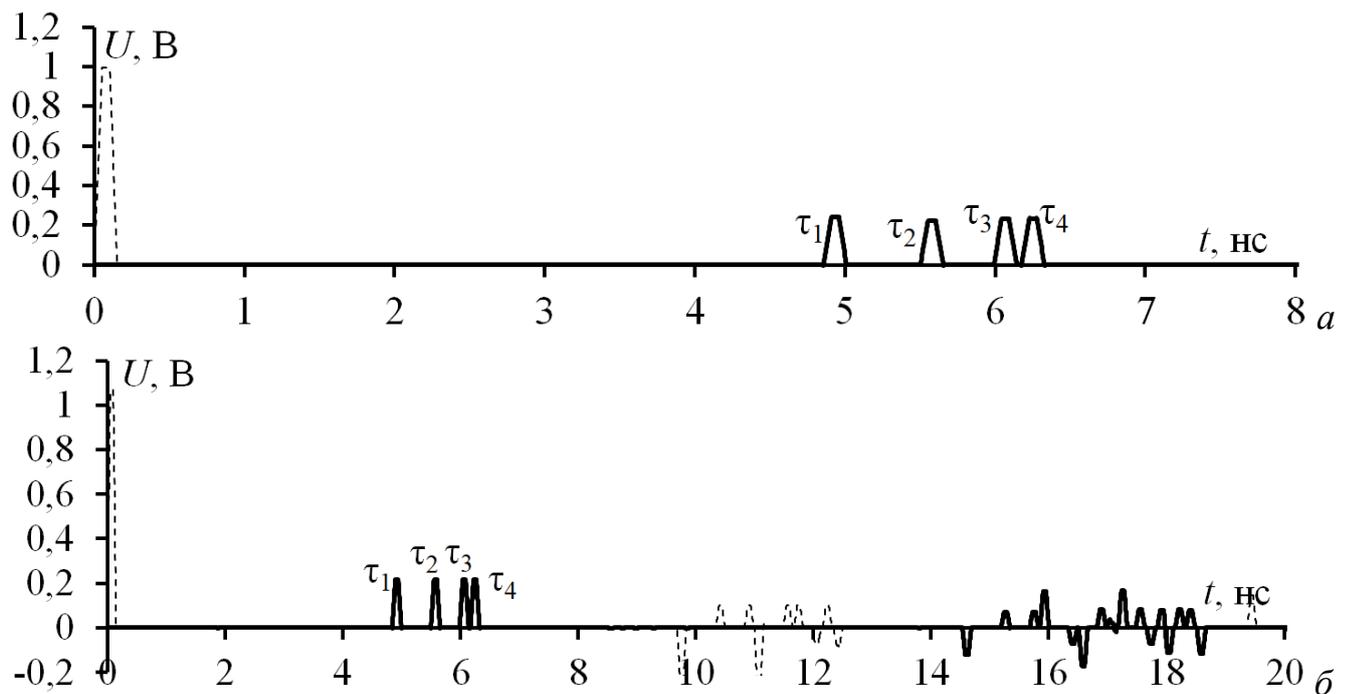


Рисунок 3.64 – Формы напряжения на входе ( - - ) и выходе ( - ) МФ при нагрузках на концах пассивных проводников по 50 Ом (а) и ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ (б)

### 3.5 Основные результаты раздела

1. Представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения МФ на ДПП для двух способов соединения опорных проводников (только на концах и вдоль всей длины). Оптимизация выполнялась по двум основным критериям: максимизация разности погонных задержек мод и минимизация амплитуд импульсов разложения исходного СКИ за счет их выравнивания. Показано, что при соединении опорных проводников на конце и малом значении  $s$  между сигнальными и опорными проводниками, к выходу МФ приходят 3 импульса (несмотря на 5 распространяющихся мод в линии) и 2 импульса при соединении опорных проводников вдоль всей длины.

2. Для МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах (при  $w_1=3150$  мкм,  $w_2=500$  мкм и  $s=2000$  мкм) достигнуто выравнивание амплитуд (0,309 В) импульсов разложения, что соответствует ослаблению в 3,2 раза по отношению к половине э.д.с., а разность погонных задержек мод 5 и 2

составила 2,35 нс/м. При ХХ-КЗ ослабление определяется амплитудой дополнительных импульсов, которая чуть больше, чем у основных (первых), и составило 5,6 раза. Для такого МФ выполнено моделирование влияния ширины опорных проводников ( $w_2$ ) при  $w_1=3150$  мкм и  $s=2000$  мкм. Выявлено, что на разность погонных задержек мод и амплитуду импульсов увеличение  $w_2$  влияет незначительно. При  $h=0,5$  мкм,  $t=150$  мкм,  $w=1768$  мкм и  $s=100$  мкм достигнуты максимизация и выравнивание разностей погонных задержек трех мод (1,065 нс/м), которые видно при малых значениях  $s$ .

3. Исследовано влияние удаления одного и двух опорных проводников на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах. Показано, что удаление одного опорного проводника не влияет на погонные задержки мод, а влияет на амплитуду импульсов. Удаление боковых проводников влияет только на амплитуду импульсов. При удалении диагональных проводников разность погонных задержек мод становится меньше, а амплитуда импульсов больше. Оценено влияние опорных проводников на появление импульсов. Так, на появление и амплитуду первого импульса больше всего влияет левый опорный проводник. Когда нет левого нижнего проводника, амплитуда импульса 1 меньше и составляет 0,011 В, а при его наличии – 0,335 В. Когда отсутствуют два боковых проводника, его нет вовсе. На появление импульса 3 влияют нижний и один из верхних опорных проводников.

4. Для МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины при  $h=0,5$  мм,  $s=2000$  мкм и  $w_1=3000$  мкм достигнуты разность погонных задержек мод 2,424 нс/м, и амплитуды импульсов 0,325 В при согласованном случае и 0,218 В при КЗ-ХХ или ХХ-КЗ на концах пассивного проводника.

5. Выполнено исследование влияния экрана на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины. Показано, что соединение опорных проводников с помощью экрана позволяет достичь примерно одинакового разложения СКИ вне зависимости от количества опорных проводников. Их влияние уменьшается и, фактически, заменяется экраном.

Для МФ со всеми и без диагональных опорных проводников показано влияние экрана на разложение СКИ. При увеличении расстояния от проводников до экрана ( $h1$ ) значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  увеличиваются, однако их разность уменьшается. При отдалении экрана от проводников амплитуда импульса 1 уменьшается, а 2 – увеличивается. Наибольшее влияние происходит на амплитуду моды 1. Больше влияние на  $U_1$  наблюдается в МФ без двух диагональных проводников. При  $h1 > 3$  мм погонные задержки мод и амплитуды импульсов для двух МФ перестают изменяться. Это показывает, что влияние экрана (при таких параметрах МФ) становится минимальным.

6. Рассмотрено появление дополнительных импульсов в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах и вдоль всей длины. Также, их появление оценено для МФ с опорными проводниками, соединенными только на концах, в структурах, полученных из него удалением одного и двух опорных проводников. Показано, что при соединении опорных проводников только на концах, дополнительных импульсов больше в согласованном случае и при КЗ-ХХ. Так, если в первом случае соединения опорных проводников при КЗ-ХХ их 2, а при  $R2=R4=50$  Ом их нет вовсе, то во втором случае соединения их 4 и 7 соответственно. Задержки дополнительных импульсов определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии.

Показано, что с удалением одного опорного проводника дополнительных импульсов становится больше. В двух структурах МФ количество (их по 16) и полученные комбинации дополнительных импульсов совпадают, но меняется их полярность и амплитуда. Задержки дополнительных импульсов определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии.

С удалением двух опорных проводников дополнительных импульсов стало меньше. Полярности импульсов в двух МФ одинаковы, но в МФ без левых опорных проводников амплитуды импульсов больше.

7. Выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями. Достигнуты максимизация разности

максимальной и минимальной задержек импульсов ( $\tau_7 - \tau_2 = 2,45$  нс/м), выравнивание (0,77 нс/м) разностей задержек мод 3 и 2, 7 и 6, максимизация (до 0,91 нс/м), максимизация ослабления исходного СКИ: 4 раза в согласованном случае и 10 раз при ХХ-КЗ на концах всех пассивных проводников.

8. Показана возможность разложения СКИ в исходном МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями и в его конфигурациях с удалением одного и двух пассивных проводников. При рассмотренных параметрах наибольшее ослабление СКИ к половине э.д.с. достигнуто в МФ без левого верхнего пассивного проводника: 2,74 раза, тогда как было 2,35 раза без удаления проводников. Примечательно, что почти таким же ослабление осталось и при удалении диагональных и левых проводников.

9. Выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями без левого нижнего пассивного проводника. Достигнуты максимизация (до 0,942 нс/м) разности максимальной и минимальной задержек импульсов, близкие значения разностей задержек мод 3 и 2, 6 и 3 (0,936 и 0,941 нс/м), выравнивание амплитуд импульсов 3 и 6 (0,329 В).

10. Показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричном МФ на ДПП. При равной ширине всех проводников импульсы 3 и 4 накладываются друг на друга, что приводит к увеличению амплитуды. Однако, возможно увеличить разность погонных задержек мод, соответствующих этим импульсам, за счет уменьшения  $w_1$  и  $s$ , а также увеличения  $w_2$  и  $h$ . Так, при  $w_1 = 1$  мм,  $w_2 = 3,6$  мм,  $s = 0,3$  мм,  $h = 2$  мм и  $t = 70$  мкм получено  $\tau_2 - \tau_1 = 0,644$  нс/м,  $\tau_3 - \tau_2 = 0,489$  нс/м и  $\tau_4 - \tau_3 = 0,184$  нс/м, а ослабление составляет 4 раза при нагрузках на концах всех проводников по 50 Ом и 5 раз при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-КЗ.

11. Выполнен сравнительный анализ МФ на ДПП. Это позволило выявить ряд достоинств и недостатков каждого из устройств по ряду признаков.

## **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Здесь представлены результаты: подготовительного моделирования по нескольким критериям [134, 107] и анализа влияния граничных условий на концах пассивного проводника при заданном наборе [135] и в диапазоне [136] параметров, для изготовления лабораторного макета МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости; вычислительного и натурального экспериментов для МФ со слабой и сильной связями между активным и пассивным проводниками, во временной и частотной областях [137]. Кроме того, представлены результаты оптимизации для изготовления лабораторных макетов МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах, со всеми проводниками и без верхнего опорного проводника. Наконец, представлены результаты: вычислительного и натурального экспериментов для МФ на ДПП со всеми опорными проводниками, соединенными только на концах, и без верхнего опорного проводника, во временной и частотной областях; вычислительного и натурального экспериментов, подтверждающих ослабление СКИ с помощью двух вырезов в КПЛ, во временной области.

### **4.1 Экспериментальное исследование модального фильтра с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости**

Здесь представлены результаты экспериментального подтверждения модальной фильтрации в МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости.

#### **4.1.1 Моделирование для изготовления лабораторного макета**

Выполнено тщательное подготовительное моделирование для изготовления лабораторного макета МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной

плоскости. Поперечное сечение и эквивалентная схема показаны в разделе 2.1.1 и здесь не приводятся.

Ранее выявлено, что при малых значениях  $h$  и  $t$  разность погонных задержек мод увеличивается, а амплитуда импульсов уменьшается (раздел 2.1), поэтому дальнейшее моделирование выполнялось при  $h=0,18$  мм и  $t=35$  мкм. Большая разность погонных задержек мод (2,16 нс/м) позволяет уменьшить длину ( $l$ ) МФ с 1 м до 30 см. Так,  $w$  менялось в диапазоне от 0,8 до 1,5 мм с шагом 0,1 мм при  $s=0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм. Оптимизация выполнялась по критериям минимизации максимальной из амплитуд импульсов до их выравнивания. На рисунке 4.1 приведены зависимости амплитуд второго ( $U_2$ ) и последнего ( $U_3$ ) импульсов разложения от  $w$ , при  $s=0,2; 0,3; 0,4$  мм. Выравнивание амплитуд и минимизация до 0,34 В достигаются при  $w=1$  мм и  $s=0,5$  мм.

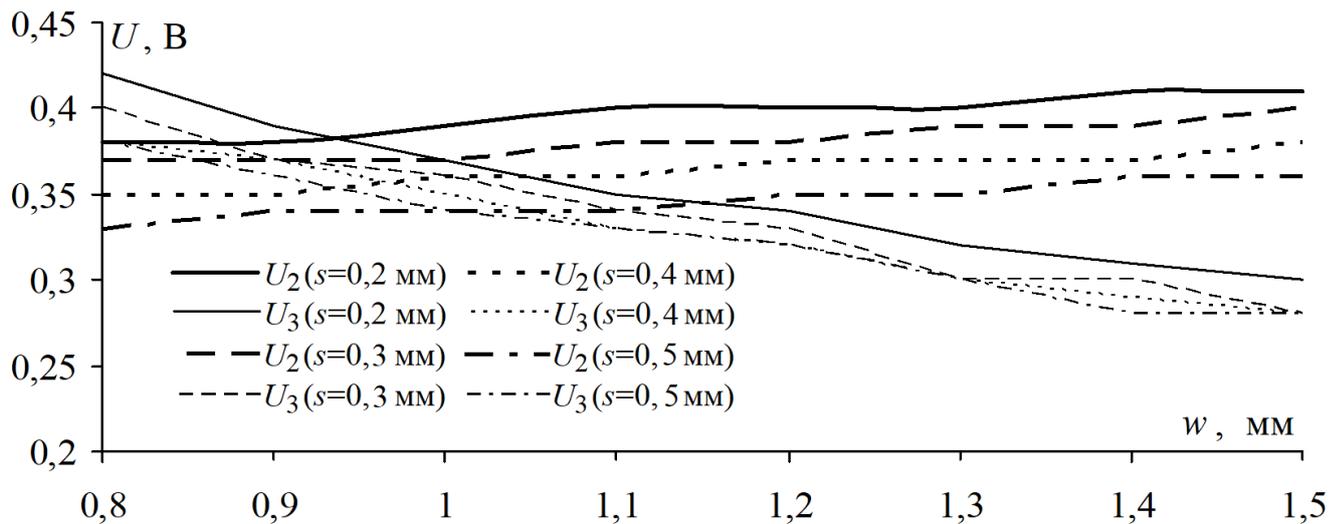


Рисунок 4.1 – Зависимость  $U_2$  и  $U_3$  от  $w$  при  $s=0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм

Результаты моделирования отклика показаны на рисунке 4.2. Как видно, амплитуда выходного напряжения равна 0,34 В. Это соответствует ослаблению в 2,94 раза по отношению к половине э.д.с.

Для МФ с такими параметрами рассмотрено безрезистивное подключение. Результаты представлены на рисунке 4.3. Ослабление составляет 4,54 раза. Амплитуды импульсов разложения при КЗ-ХХ и ХХ-КЗ одинаковы ( $U_2=0,22$  В,  $U_3=0,25$  В).

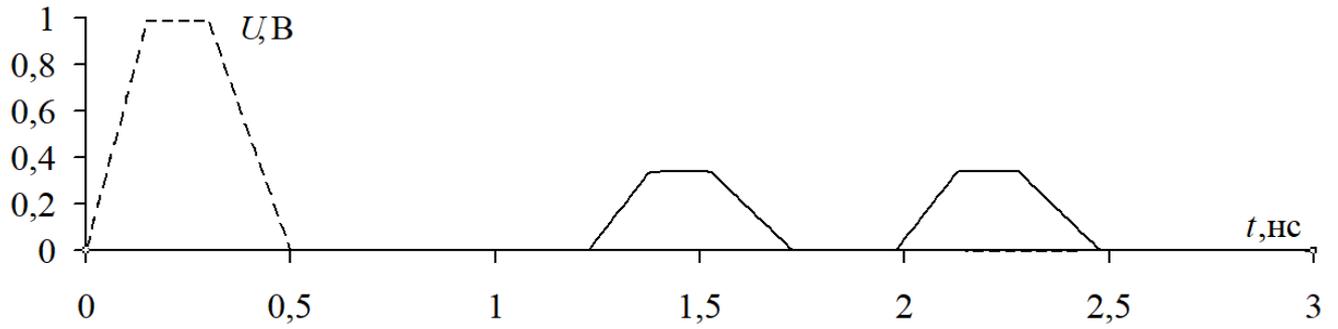
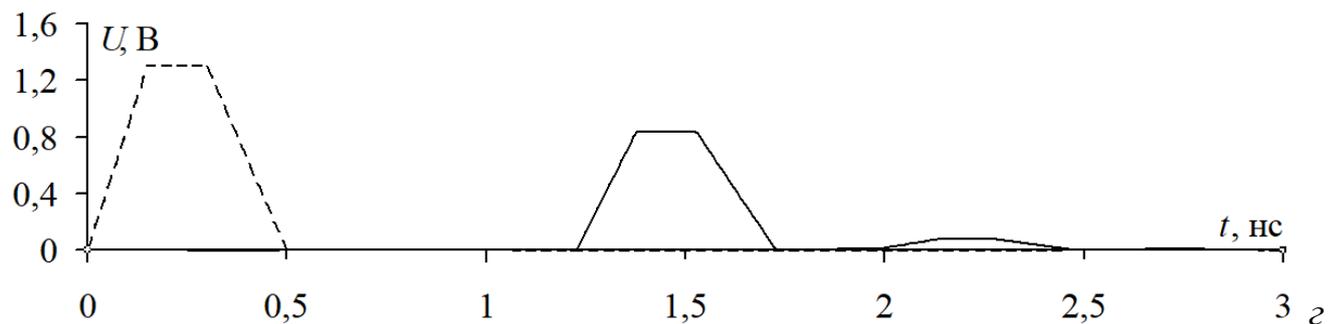
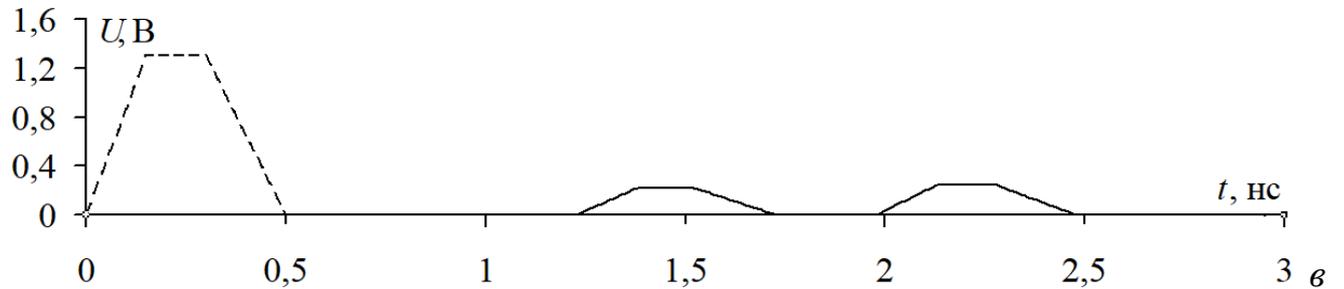
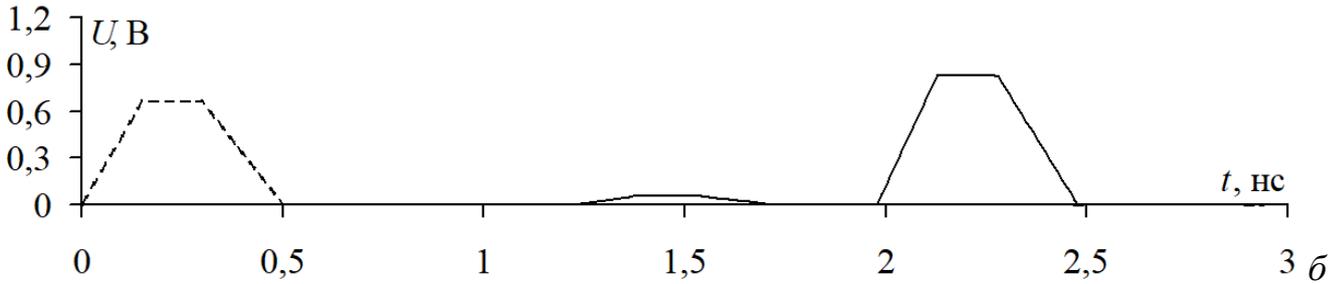
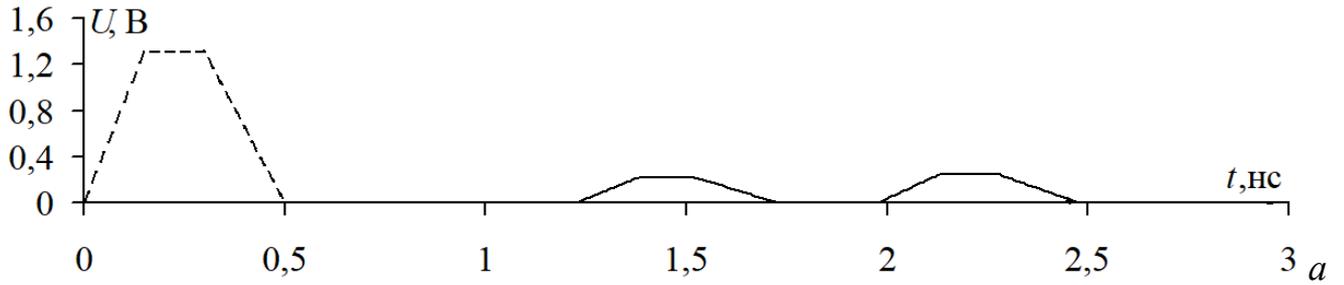


Рисунок 4.2 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

Рисунок 4.3 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ  
при КЗ-XX (а), КЗ-КЗ (б), XX-КЗ (в), XX-XX (г)

Выполнено исследование по увеличению связи между активным и пассивным проводниками. Так как параметры материала фиксированы, для

увеличения связи одновременно увеличивалась только ширина активного ( $w_1$ ) и пассивного ( $w_2$ ) проводников ( $w_1=w_2$ ) от 1 до 3,5 мм (с шагом 0,1 мм) и  $s$  от 0,5 до 3,5 мм (с шагом 0,2 мм). Ширина боковых проводников ( $w_3$ ) не менялась и была принята 0,5 мм. Оптимизация выполнялась по критериям минимизации амплитуды выходного напряжения и увеличения разности задержек мод.

Зависимости  $\tau$  от  $w_1$  для разных  $s$  приведены на рисунке 4.4. Значения  $\tau$ , не смотря на увеличение связи, меняются слабо. Причина в том, что обе быстрые моды распространяются почти полностью в воздухе, а медленная – в диэлектрике.

Для всех значений  $w_{1,2}$  и  $s$  вычислены формы напряжения аналогично рисунку 4.4. Они показали, что амплитуда выходного напряжения определяется изменяющимися амплитудами импульсов 2 и 3. Их зависимости от  $w_{1,2}$  для разных  $s$  приведены на рисунке 4.5.

Амплитуда импульса 1 зависит от  $w_1$  слабо, но с ростом  $s$  уменьшается примерно от 0,3 до 0,2 В. Амплитуда импульса 2 с ростом  $w_1$  уменьшается примерно от 0,35 до 0,15 В, но от  $s$  зависит слабо. В результате графики пересекаются в точке, соответствующей равенству амплитуд импульсов, которые уменьшаются до 0,21 В с ростом  $s$  до 3,5 мм при  $w_{1,2}=2,1$  мм. Формы напряжения для этого случая приведены на рисунке 4.6.

Также, выполнено исследование влияния режимов включения «начало-конец» пассивного проводника: КЗ-ХХ, КЗ-КЗ, ХХ-КЗ, ХХ-ХХ в диапазоне параметров. Для всех значений  $w_{1,2}$  и  $s$  вычислены формы напряжения, однако, приведены графики (рисунок 4.7), только для режима КЗ-ХХ, т.к. большее ослабление СКИ происходит именно в этом режиме. Анализ рисунка 4.7 показывает монотонное убывание  $U_2$  и  $U_3$  с увеличением  $w_{1,2}$ , однако при некоторых значениях это уменьшение немонотонно. Из рисунка 4.7а видно, что  $U_2$  с ростом  $w_{1,2}$  уменьшается с 0,24 до 0,12 В, а  $U_3$  с 0,21 до 0,12 В. С ростом  $s$  амплитуда также становится меньше,  $U_2$  от 0,24 В (рисунок 4.7а) до 0,18 В (рисунок 4.7з), а  $U_3$  от 0,21 В (рисунок 4.7а) до 0,15 В (рисунок 4.7з). Минимальная амплитуда 0,10 В достигнута при  $s=3,3$  мм,  $w_1=3,3$  мм.

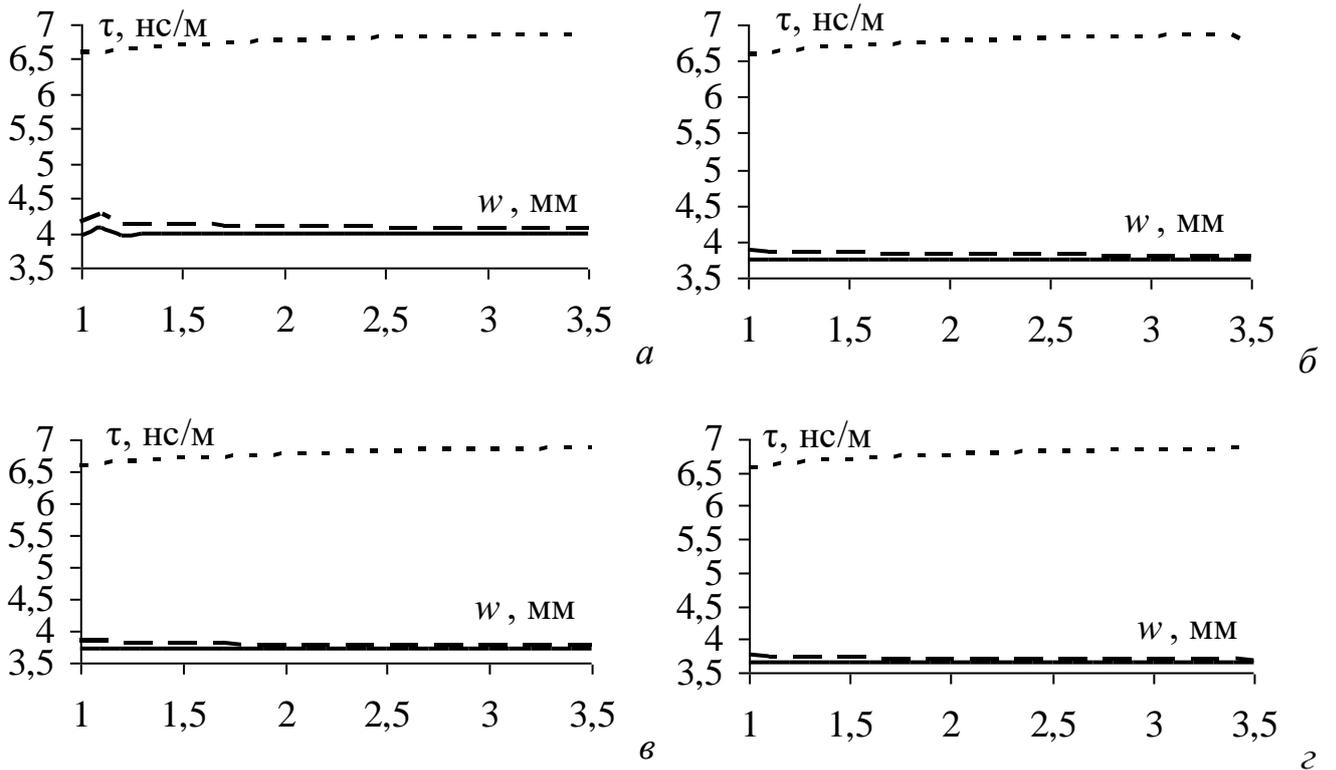


Рисунок 4.4 – Зависимости  $\tau_1$  (—),  $\tau_2$  (---),  $\tau_3$  (- · -) от  $w$   
при  $s=0,7$  (а), 1,9 (б), 2,3 (в), 3,5 (г)

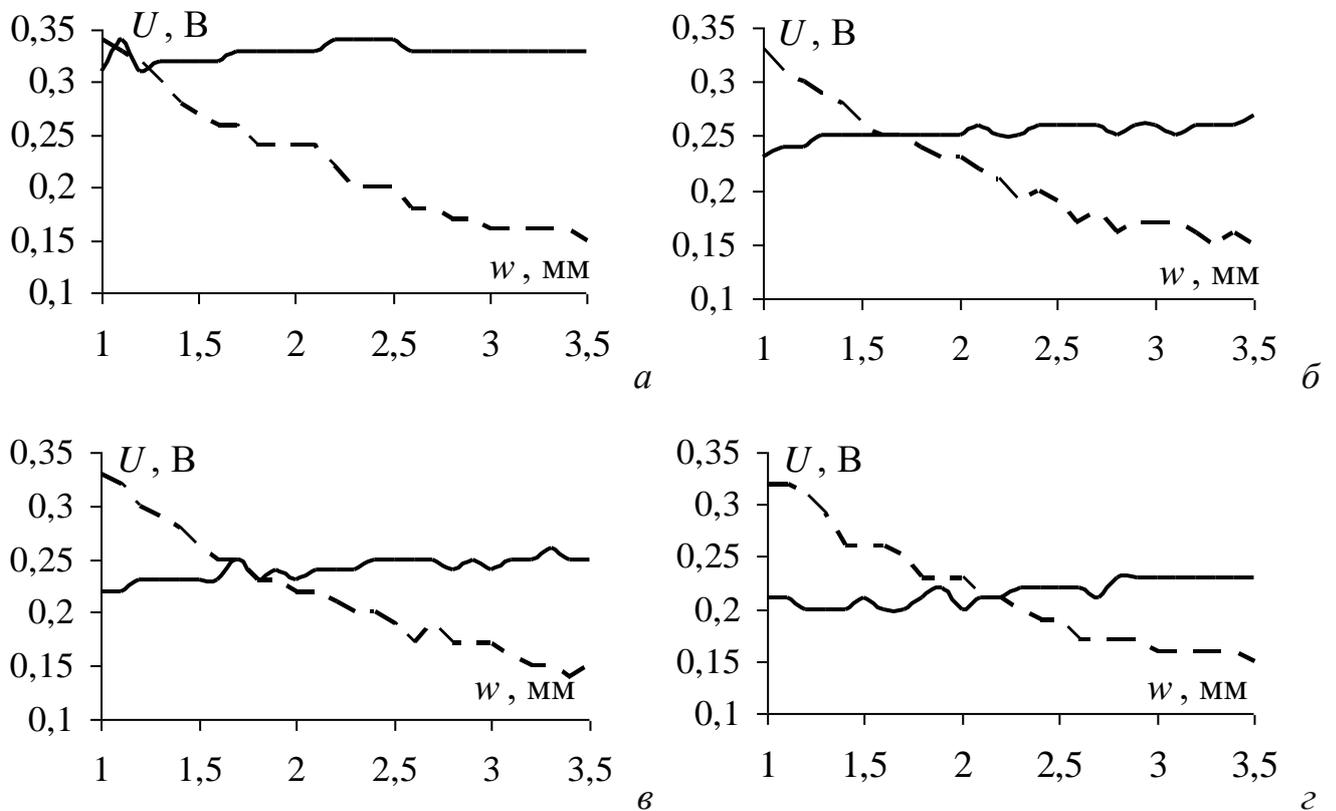


Рисунок 4.5 – Зависимости  $U_2$  (—) и  $U_3$  (---) от  $w$   
при  $s=0,7$  (а), 1,9 (б), 2,3 (в), 3,5 (г)

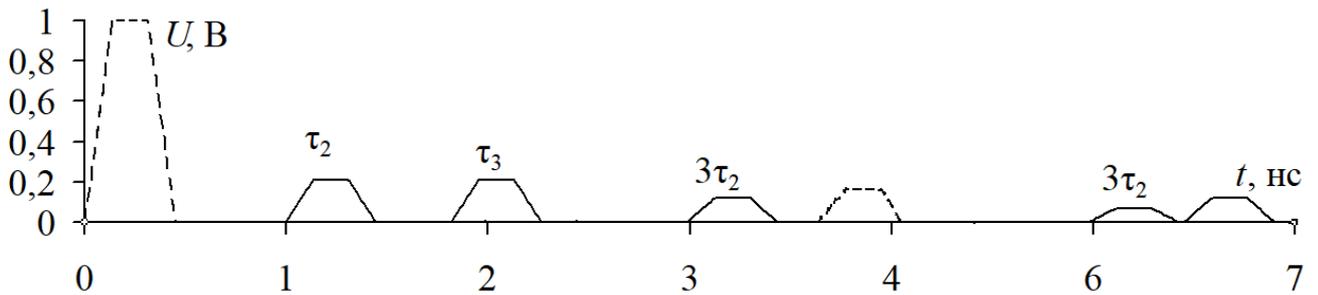


Рисунок 4.6 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ  
при  $s=3,5$  мм и  $w_{1,2}=2,1$  мм

На рисунке 4.8 показаны результаты моделирования на входе и выходе МФ при  $s=3,3$  мм,  $w_{1,2}=3,3$  мм, где достигнута самая сильная связь. Амплитуды импульсов разложения при КЗ-ХХ и ХХ-КЗ одинаковы и равны 0,1 В. При ХХ-ХХ  $U_2=0,69$  В и  $U_3=0,01$  В, а КЗ-КЗ  $U_2=0,01$  В и  $U_3=0,51$  В.

В результате, показано, что для типовых параметров материала подложки и увеличения связи между активным и пассивным проводниками при граничных условиях КЗ-ХХ можно достичь большего ослабления СКИ (около 10 раз по отношению к половине э.д.с.). При этом может существовать несколько значений параметров, при которых амплитуды основных импульсов равны.

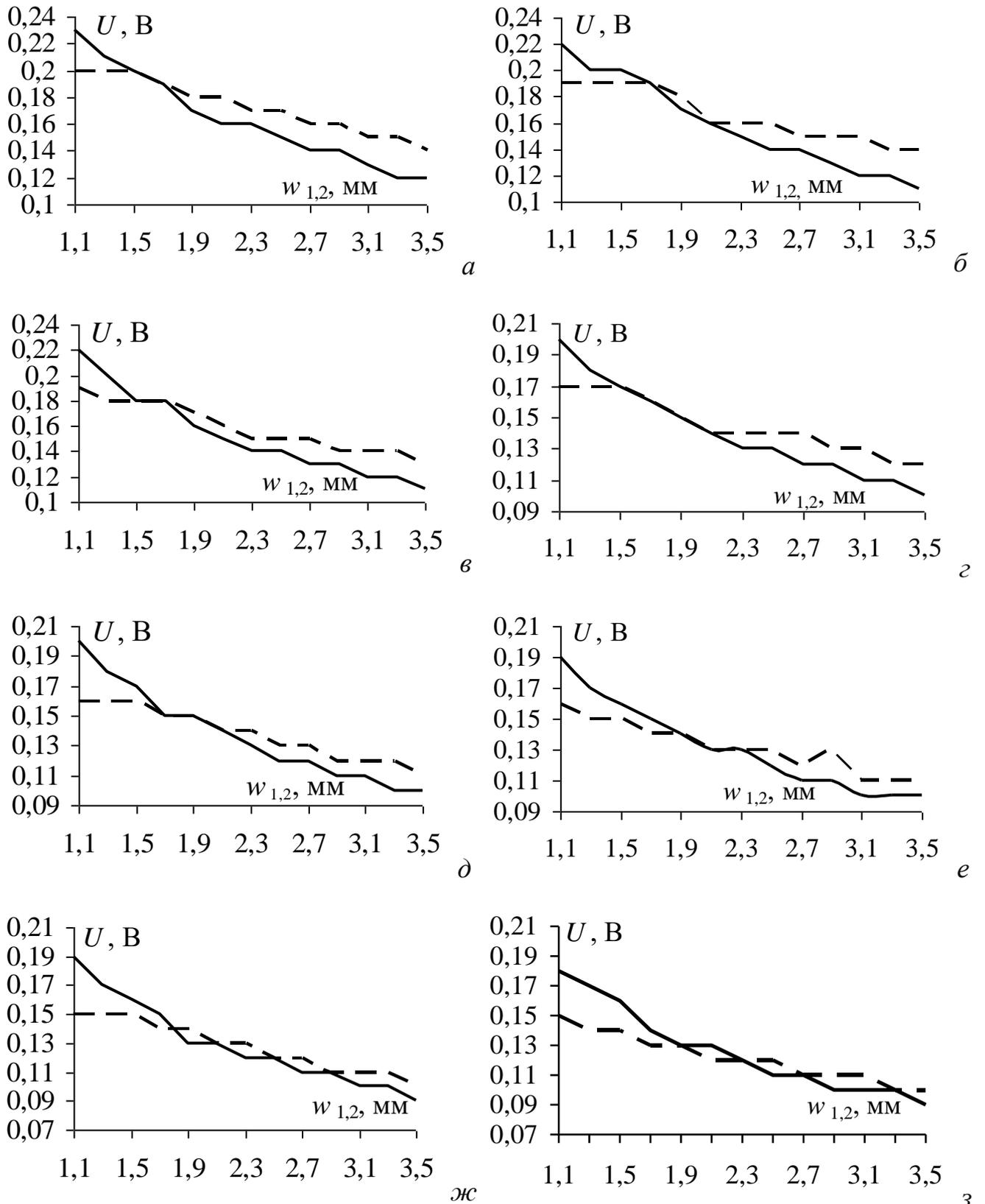


Рисунок 4.7 – Зависимости  $U_2$  (-) и  $U_3$  (- -) от  $w$   
 при  $s=0,7$  (*a*),  $0,9$  (*б*),  $1,3$  (*в*),  $1,7$  (*г*),  $2,1$  (*д*),  $2,5$  (*е*),  $2,9$  (*ж*),  $3,3$  (*з*)

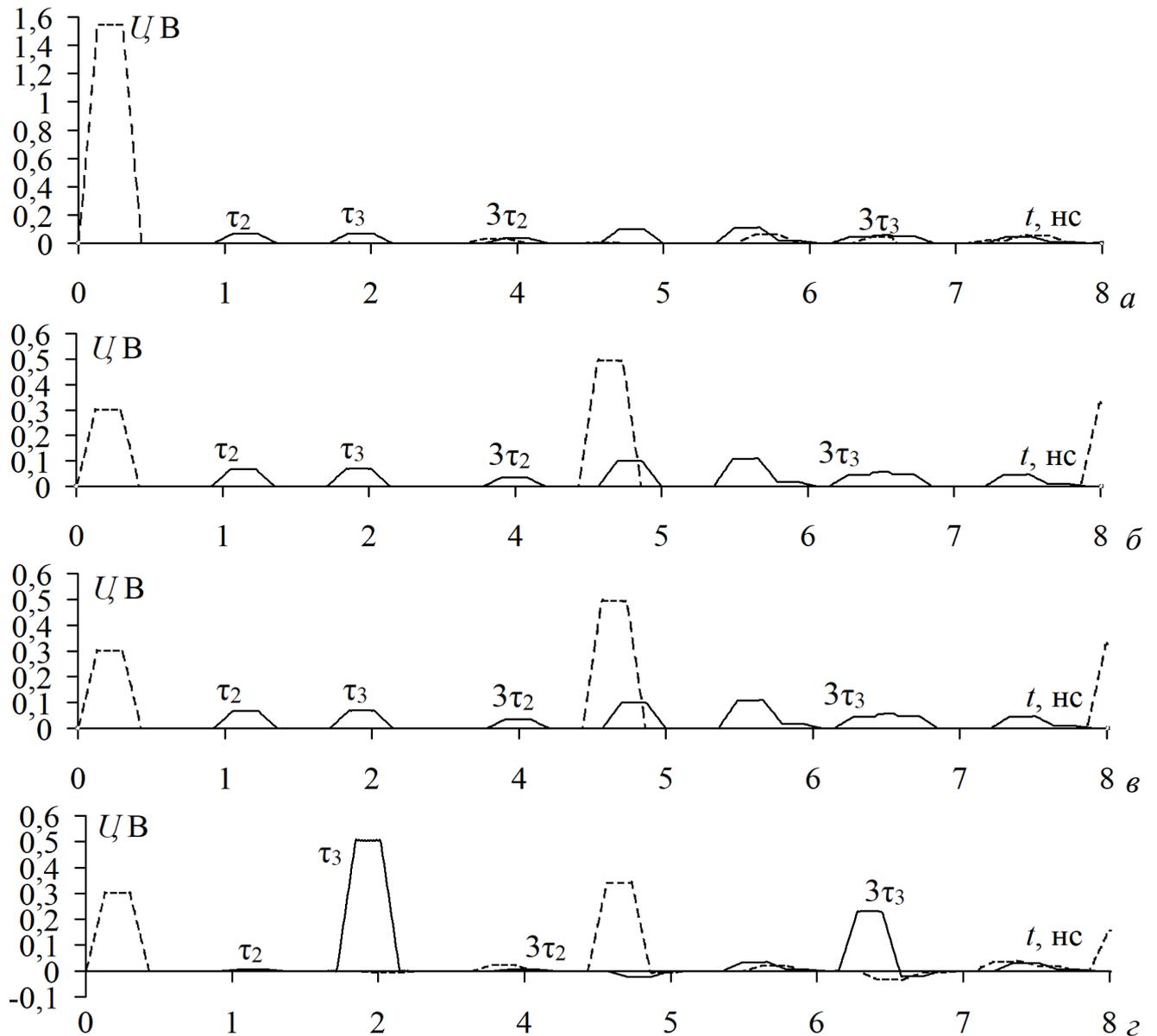


Рисунок 4.8 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (—) МФ

при разных режимах включения пассивного проводника:

КЗ-ХХ (а), ХХ-КЗ (б), КЗ-КЗ (в), ХХ-ХХ (г)

#### 4.1.2 Макеты модальных фильтров

Изготовление макетов выполнялось с типовыми параметрами отечественного двухслойного фольгированного стеклотекстолита  $t=35$  мкм,  $h=0,18$  мм. Так, ранее показано, что при  $w_1=w_2=w_3=1$  мм и  $s=0,5$  мм, когда связь между активным и пассивным проводниками слабая, можно достичь ослабления СКИ около 2,54 раза (при нагрузках на концах пассивного проводника по 50 Ом) и

4,54 раза (при КЗ-ХХ на концах пассивного проводника), а при  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм и  $s=3$  мм, когда связь сильная, можно достичь ослабления примерно в 5 раз (при  $R=50$  Ом) и в 10 раз (при КЗ-ХХ). Между тем представляет интерес экспериментальное подтверждение возможности такого ослабления. Поэтому для проведения натурного эксперимента изготовлены макеты МФ со слабой и сильной связями между проводниками. Для дальнейшего упрощения записи будем называть МФ1 при  $w_1=w_2=w_3=1$  мм,  $s=0,5$  мм и МФ2 при  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм,  $s=3$  мм.

Выполнена трассировка макетов ПП для МФ1 и МФ2. Длины МФ составляют 300 мм, а размеры ПП составляют 125 мм, поэтому МФ выполнены в форме меандра. Для исключения уменьшения влияния полувитков друг на друга, между ними выбрано увеличенное расстояние  $5w_1$ . Трассировка МФ1 показана на рисунке 4.9, а МФ2 – на рисунке 4.10.

Для присоединения МФ к измерительному оборудованию предусмотрены контактные площадки (КП) с размерами  $8\times 8$  мм для МФ1 и  $8\times 12$  мм для МФ2. Для установки SMA-соединителей в каждой КП присутствуют 5 отверстий (4 отверстия предназначены для опорных проводников, а одно – для активного проводника). Пассивный проводник подключается к КП через резисторы поверхностного монтажа (типоразмер – 1206, сопротивление – 50 Ом).

Изготовленный лабораторный макет МФ1 представлен на рисунке 4.9, а МФ2 – на рисунке 4.10.

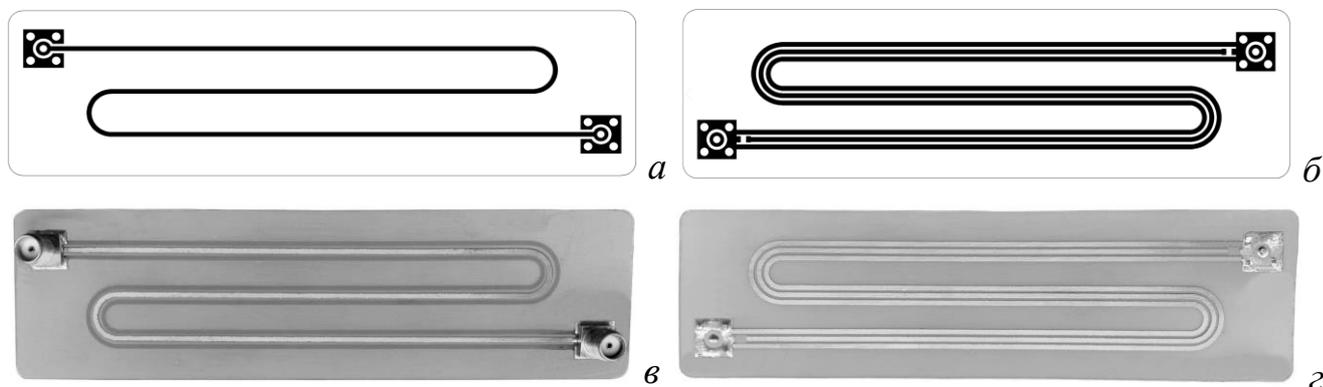


Рисунок 4.9 – Фотошаблоны макета МФ1 (верхний (а) и нижний (б) слой) и фото макета МФ1 (верхний (в) и нижний (г) слой)

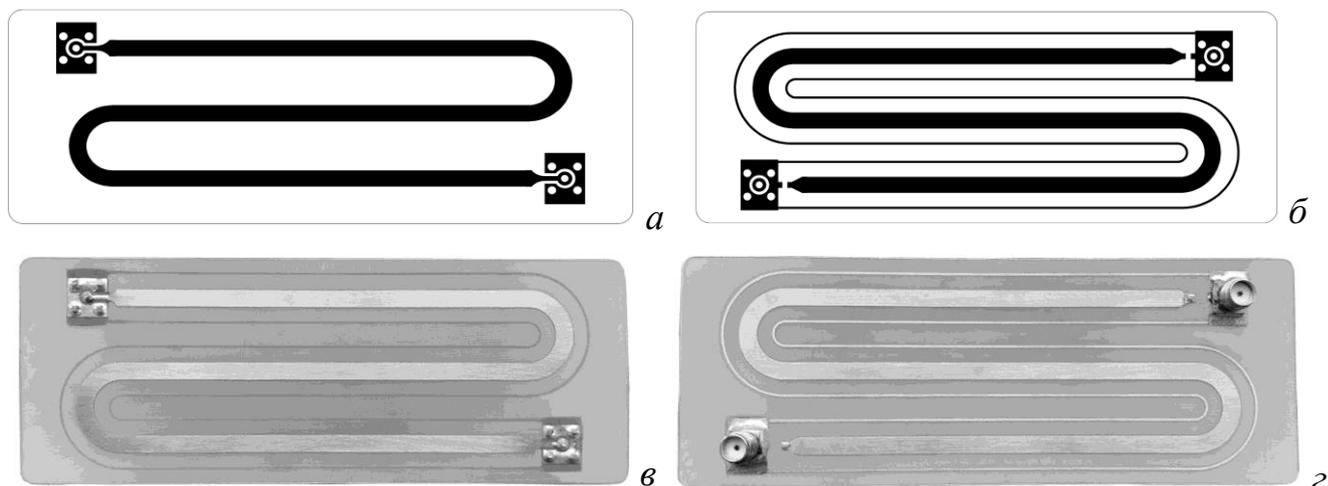


Рисунок 4.10 – Фотошаблоны макета МΦ2 (верхний (а) и нижний (б) слои) и фото макета МΦ2 (верхний (а) и нижний (б) слои)

После изготовления МΦ проведен контроль геометрических параметров. С помощью увеличительного стекла с измерительной линейкой (рисунок 4.11а) контролировалась ширина печатных проводников. Толщина диэлектрической подложки и проводников измерялись с помощью механического микрометра (рисунок 4.11б). Получены реальные значения геометрических параметров, средние значения которых составили: для МΦ1  $h=0,18$  мм,  $t=0,033$  мкм,  $w_1=w_2=w_3=1$  мм, а для МΦ2  $h=0,18$  мм,  $t=0,033$  мкм,  $w_1=w_2=3,5$  мм,  $w_3=0,5$  мм.



Рисунок 4.11 – Увеличительное стекло с измерительной линейкой (а) и механический микрометр (б)

### 4.1.3 Экспериментальные исследования временных характеристик

Экспериментальная установка предназначенная для проведения измерений во временной области приведена на рисунке 4.12. Для устранения систематической ошибки измерений и достижения максимально возможной

точности приема сигналов выполнена калибровка вертикального и горизонтального трактов. Предел погрешности регистрации мгновенных значений импульсного сигнала составили  $\pm 2\%$  для временных интервалов и  $\pm 3\%$  по амплитуде.



Рисунок 4.12 – Экспериментальная установка, предназначенная для регистрации сигналов во временной области

На рисунке 4.13 показаны используемые коаксиальные переходники, предназначенные для присоединения макетов МФ со стробоскопическим преобразователем и формирователем импульса, а также для присоединения к скалярному анализатору цепей. При анализе временного отклика использовались 4 коаксиальных переходника: ПК2-18-01Р-03Р (3), ПК2-18-11Р-03Р (4), НУР-1111 (5) и НУР-1112 (6). При анализе частотного отклика использовались 2 коаксиальных переходника: ПК2-40-14Р-05 (1) и ПК2-50-05-05 (2). Общее время задержки всех переходов, используемых при анализе временного отклика, составило 230 пс. При этом вносимые затухания не превышают 1 дБ во всем исследуемом частотном диапазоне.



Рисунок 4.13 – Коаксиальные переходники

Сравнение результатов измерений и моделирования выполнено с использованием двух различных подходов: квазистатического и электродинамического. Моделирование посредством квазистатического анализа проводилось в системе TALGAT. При моделировании учитывалось, что при учащении сегментации (на торцах проводников) точность результатов увеличивается, поэтому при моделировании принято  $n=5$ , где  $n$  – число сегментов на торце проводников. При электродинамическом моделировании, исследуемая структура разбивалась на ячейки, минимальный размер которых составил 11,6 мкм. В качестве материала проводников полагалась медь с удельной электрической проводимостью  $\sigma=5,8 \cdot 10^7$  См/м.

При моделировании с помощью обоих подходов в качестве материала диэлектрической подложки выбран стеклотекстолит марки FR-4. Значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  на частоте 1 МГц составили 4,5 и 0,018 соответственно.

Моделировались режимы включения «начало-конец» пассивного проводника выполнялось: КЗ-ХХ, ХХ-КЗ, где КЗ задавалось сопротивлением  $10^{-6}$  Ом, а ХХ –  $10^9$  Ом.

В качестве воздействующего импульса при моделировании использовался оцифрованный сигнал осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, измеренный на согласованной нагрузке (рисунок 4.14). Импульс имеет колоколообразную форму амплитудой 0,284 В и длительностями фронта и спада и плоской вершины 320 и 220 пс по уровням 0,1–0,9. Общая длительность импульса по уровню 0,5 составила 180 пс.

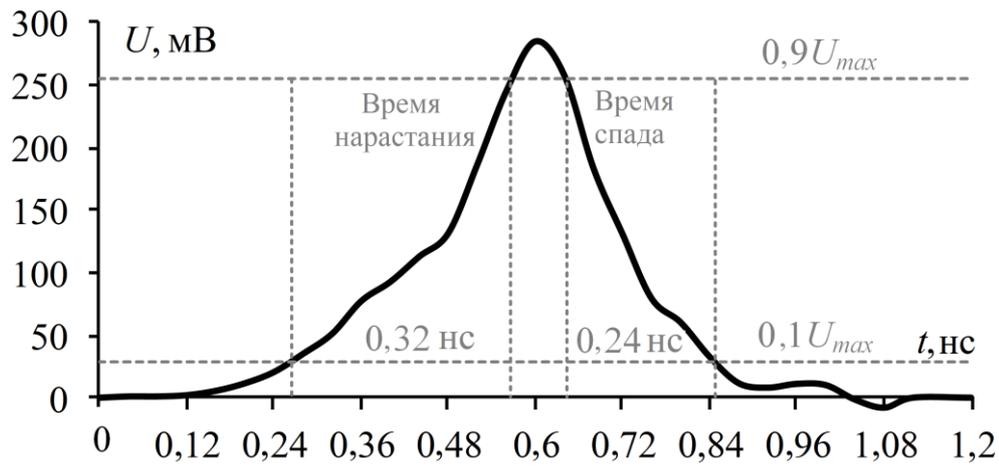


Рисунок 4.14 – Оцифрованный сигнал осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, используемый в качестве входного воздействия

На рисунках 4.15 и 4.16 показаны результаты натурального и вычислительного экспериментов во временной области для МФ1 и МФ2 соответственно.

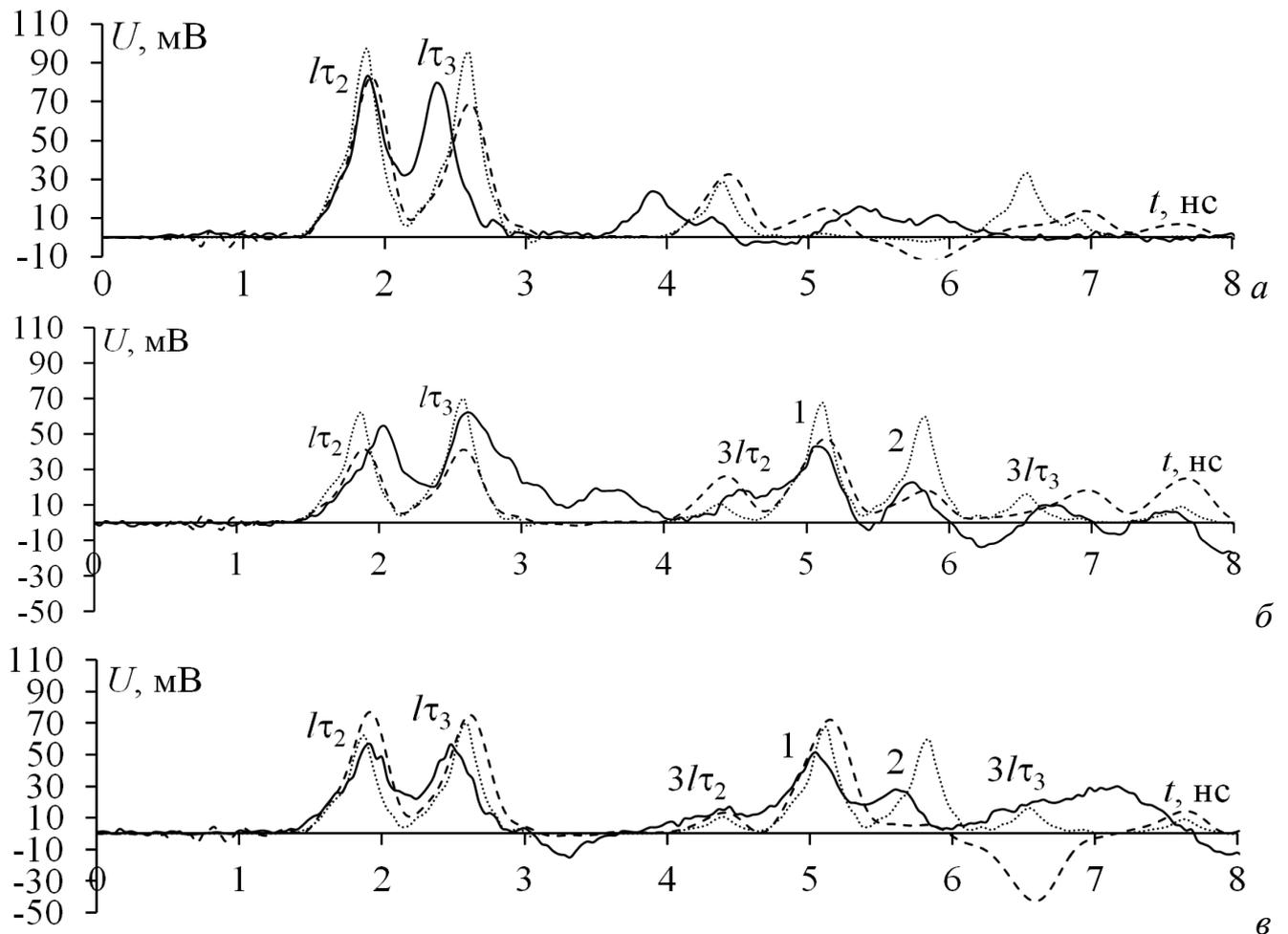


Рисунок 4.15 – Формы напряжения на выходе МФ1 при эксперименте (—), электродинамическом (---) и квазистатическом (···) моделировании при  $R_2=R_4=50$  Ом (а), XX-K3 (б) и K3-XX (в)

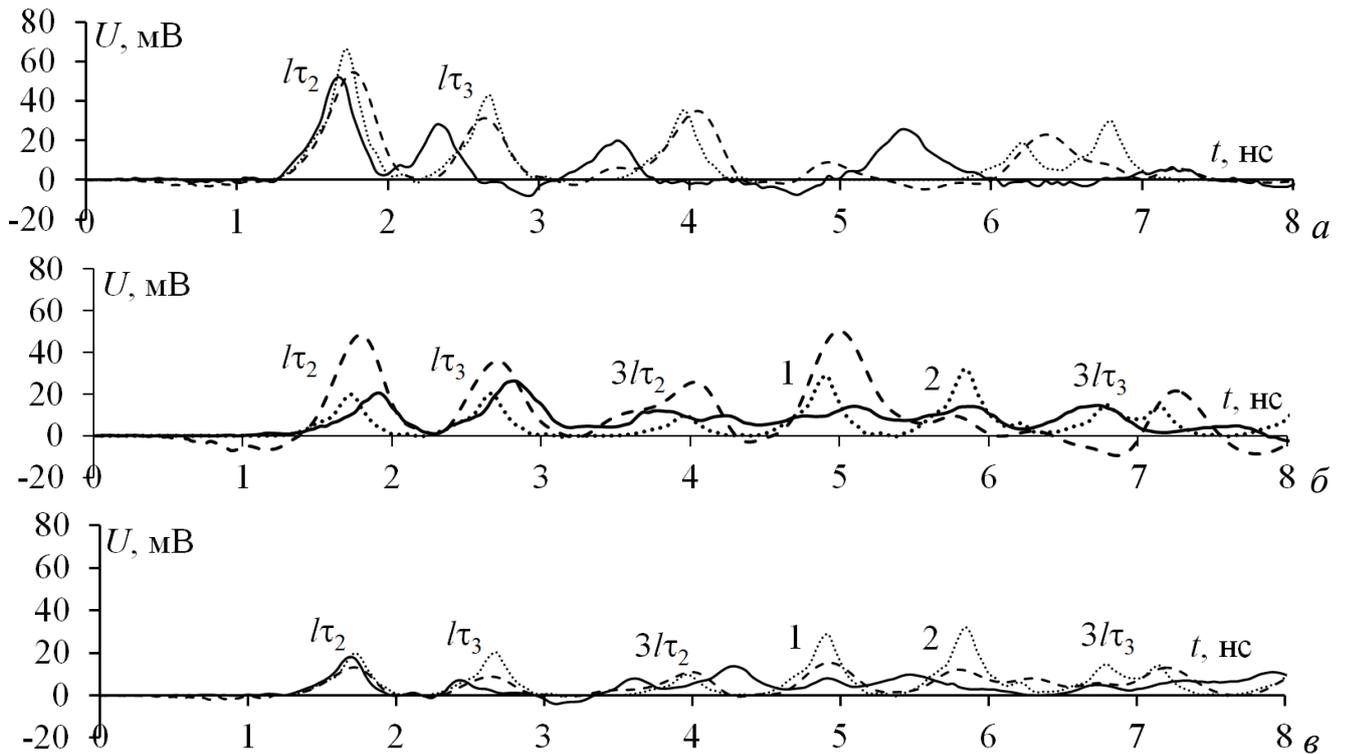


Рисунок 4.16 – Формы напряжения на выходе МФ2 при эксперименте (—),  
 электродинамическом (---) и квазистатическом (···) моделировании  
 при  $R_2=R_4=50$  Ом (а), ХХ-КЗ (б) и КЗ-ХХ (в)

Из рисунков 4.15 и 4.16 видно, что СКИ раскладывается на 2 импульса меньшей амплитуды (с задержками  $l\tau_2$  и  $l\tau_3$ ). Это объясняется тем, что моды 1 и 2 приходят с разницей примерно в 20 пс, поэтому происходит их наложение. В эксперименте наблюдается меньшая разность задержек мод. Это может быть обусловлено тем, что реальная  $\epsilon_r$  меньше принятой в моделировании. Амплитуда импульсов с увеличением связи между проводниками и изменением граничных условий (КЗ-ХХ, ХХ-КЗ) становится меньше. Так, для МФ1 (при нагрузках на концах пассивного проводника по 50 Ом) по результатам эксперимента  $U_1=84$  мВ и  $U_2=79$  мВ (рисунок 4.15а), квазистатического моделирования –  $U_1=98$  мВ и  $U_2=95$  мВ, а электродинамического моделирования –  $U_1=82$  мВ и  $U_2=68$  мВ. Для МФ2, по результатам эксперимента  $U_1=60$  мВ и  $U_2=43$  мВ (ослабление в 2,3 раза, рисунок 4.16а), квазистатического моделирования –  $U_1=66$  мВ и  $U_2=42$  мВ, а электродинамического моделирования –  $U_1=54$  мВ и  $U_2=31$  мВ. При ХХ-КЗ для МФ1  $U_1=54$  мВ,  $U_2=62$  мВ (рисунок 4.15б), а МФ2 –  $U_1=20$  мВ и  $U_2=26$  мВ

(рисунок 4.16б). Максимальное ослабление входного воздействия достигнуто для МФ2 в режиме КЗ-ХХ (рисунок 4.16в) с амплитудами: по результатам квазистатического моделирования  $U_1=18$  мВ и  $U_2=20$  мВ (7,1 раза), электродинамического –  $U_1=13$  мВ и  $U_2=8$  мВ (11 раз) и эксперимента –  $U_1=18$  мВ и  $U_2=7$  мВ (7,8 раза). В МФ2 наблюдается большая разность задержек мод, вследствие чего отсутствует наложение импульсов. Достичь полного разложения СКИ можно за счет увеличения длины МФ или выбором диэлектрического материала с большим значением  $\epsilon_r$ , а также выполнив параметрическую оптимизацию по соответствующим временным критериям. Амплитуды напряжения и разности погонных задержек для первых двух импульсов при моделировании и эксперименте сведены в таблицы 4.1 и 4.2. В целом можно считать, что результаты согласуются.

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

Параметр	Квазистатика			Электродинамика			Эксперимент		
	50-50	ХХ-КЗ	КЗ-ХХ	50-50	ХХ-КЗ	КЗ-ХХ	50-50	ХХ-КЗ	КЗ-ХХ
$U_1$ , мВ	98	58	62	82	41	77	84	54	56
$U_2$ , мВ	95	67	67	68	41	75	79	62	52
$\Delta\tau$ , нс/м	0,72			0,68			0,54		

Таблица 4.2 – Амплитуды ( $U$ ) и разности погонных задержек ( $\Delta\tau$ ) для первых двух импульсов на выходе МФ2 при различных видах анализа

Параметр	Квазистатика			Электродинамика			Эксперимент		
	50-50	ХХ-КЗ	КЗ-ХХ	50-50	ХХ-КЗ	КЗ-ХХ	50-50	ХХ-КЗ	КЗ-ХХ
$U_1$ , мВ	66	20	18	54	48	13	52	20	18
$U_2$ , мВ	42	26	20	31	35	8	27	26	7
$\Delta\tau$ , нс/м	0,96			0,87			0,8		

Детальный анализ рисунков 4.15 и 4.16 показал наличие дополнительных импульсов (на рисунках 4.15 и 4.16 обозначены как 1 и 2), которые появляются при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Из рисунков 4.15б и 4.15в видно, что амплитуда дополнительного импульса 1 больше чем у импульса 2. Анализ рисунков 4.16б и 4.16в также показал наличие 2 дополнительных импульсов, но с меньшими амплитудами. В таблицах 4.3 и 4.4

приведены напряжения дополнительных импульсов по результатам моделирования и эксперимента.

Таблица 4.3 – Амплитуды ( $U$ ) дополнительных импульсов на выходе МФ1 при различных видах анализа

Параметр	Квазистатика			Электродинамика			Эксперимент		
	50-50	XX-K3	K3-XX	50-50	XX-K3	K3-XX	50-50	XX-K3	K3-XX
$U_1$ , мВ	–	67	67	–	47	72	–	43	51
$U_2$ , мВ	–	59	59	–	18	–42	–	22	18

Таблица 4.4 – Амплитуды ( $U$ ) дополнительных импульсов на выходе МФ2 при различных видах анализа

Параметр	Квазистатика			Электродинамика			Эксперимент		
	50-50	XX-K3	K3-XX	50-50	XX-K3	K3-XX	50-50	XX-K3	K3-XX
$U_1$ , мВ	–	28	27	–	47	15	–	10	8
$U_2$ , мВ	–	32	28	–	9	12	–	13	10

Несмотря на то, что формы дополнительных импульсов хорошо согласуются, оценить точное время их прихода трудно по причине их частичного наложения друг на друга из-за дисперсии. Чтобы точно проследить зависимость появления дополнительных импульсов, с помощью квазистатического моделирования вычислены погонные задержки и время прихода трех основных мод. Результаты приведены в таблице 4.5. Получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.5 – Погонные (нс/м) и общие (нс) задержки импульсов мод

	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_1 l$	$\tau_2 l$	$\tau_3 l$	$3\tau_1 l$	$3\tau_2 l$	$3\tau_3 l$
МФ1	3,98	4,23	6,58	1,17	1,24	1,88	3,581	3,81	5,92
МФ2	3,69	3,73	6,86	1,11	1,12	2,06	3,32	3,36	6,18

Таблица 4.6 – Время (нс) прихода дополнительных импульсов

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

Возникновение дополнительных импульсов в данных конфигурациях связано с асимметрией граничных условий. Это приводит к появлению волн с различными скоростями распространения в противоположных направлениях. В

конфигурации  $R_2=R_4=50$  Ом из-за лучшего согласования дополнительные импульсы не так сильно выражены.

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили возможность разложения исходного импульса в конце активного проводника на последовательность из импульсов меньшей амплитуды. Показано, что увеличением связи и изменением граничных условий можно достичь большего ослабления СКИ, но появляются дополнительные импульсы, задержки которых определяются линейной комбинацией погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии. Результаты натурного и вычислительного экспериментов хорошо согласуются по форме и времени прихода. Отклонения результатов моделирования от результатов эксперимента вызваны неучтенным влиянием коаксиально-микростриповых и коаксиальных переходов при моделировании, а также отличием значений реальных электрических параметров диэлектрика от принятых в моделировании.

#### **4.1.4 Экспериментальные исследования частотных характеристик**

Экспериментальная установка предназначенная для проведения измерений в частотной области приведена на рисунке 4.17. Исследуемые МФ подключались к измерителю модуля коэффициента передачи и отражения P2M-40. Перед проведением измерений с помощью эталонных нагрузок ХХ и КЗ проведена калибровка коэффициента отражения (канал А) и коэффициента передачи (канал В). Максимальное значение погрешности измерений не превышает 1,5 дБ в исследуемом частотном диапазоне.

Ввиду используемых в ПП соединителей SMA, диапазон частот ограничен частотой 3,5 ГГц.

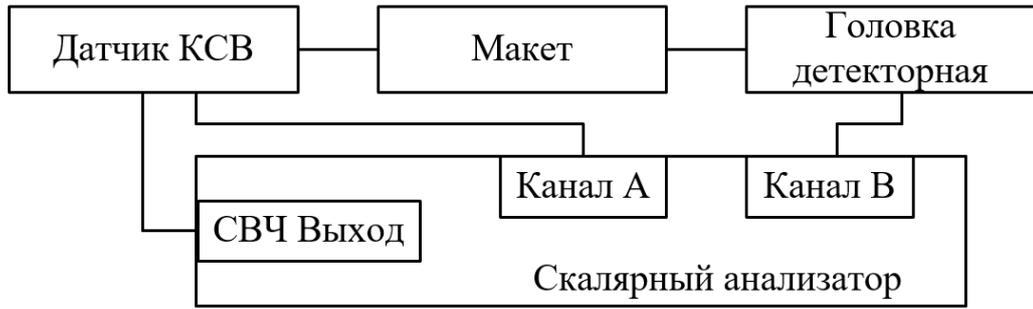


Рисунок 4.17 – Экспериментальная установка для проведения измерений в частотной области

На рисунках 4.18 и 4.19 показаны результаты эксперимента и моделирования частотной зависимости  $|S_{21}|$  для МФ1 и МФ2 соответственно. Поскольку исследуемые устройства взаимны, результаты приведены только для вариантов  $R2=R4=50$  Ом и ХХ-КЗ.

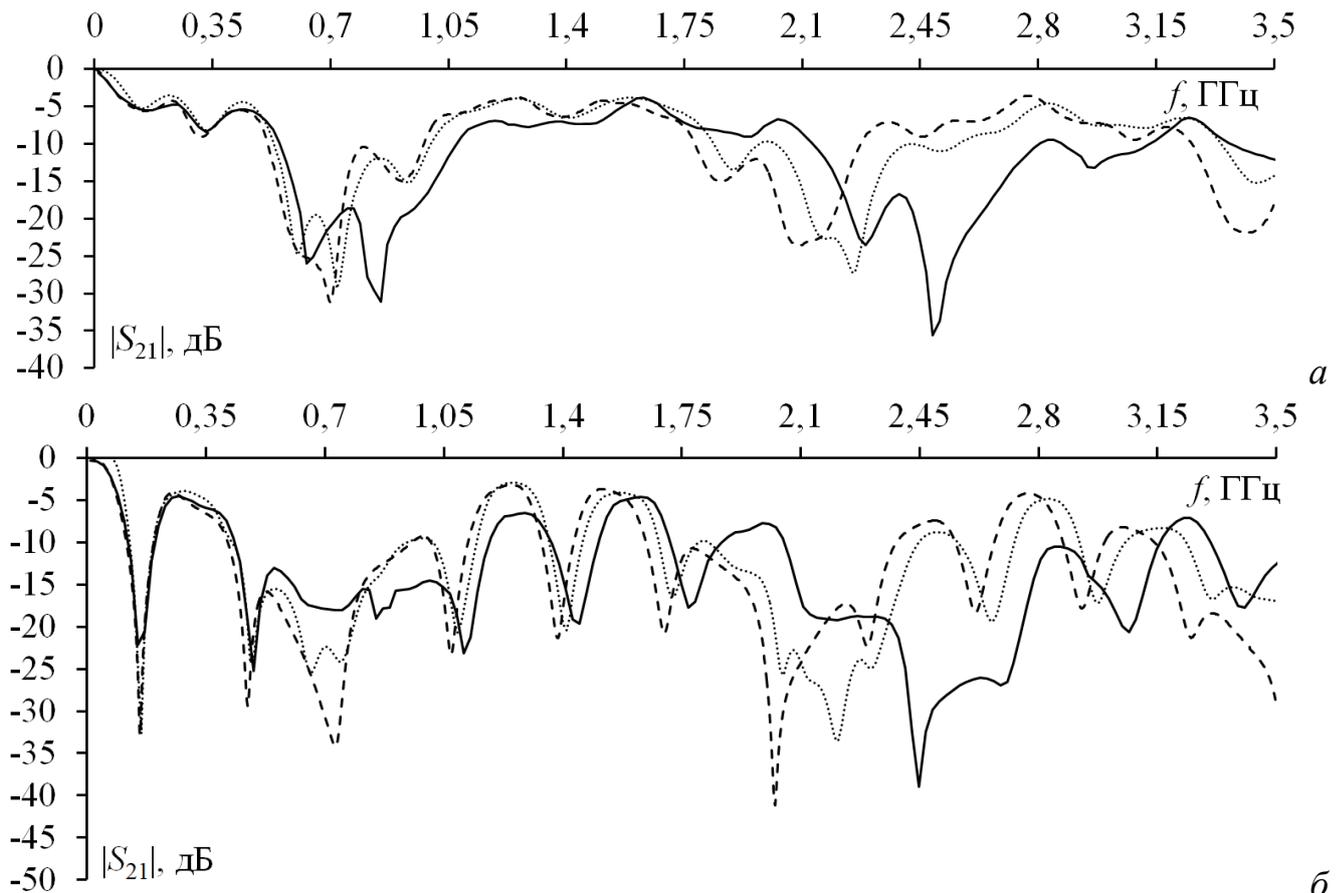


Рисунок 4.18 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  для МФ1 при  $R2=R4=50$  Ом (а), КЗ-ХХ (б) при квазистатическом (··) и электродинамическом моделировании (- -) и эксперименте (-)

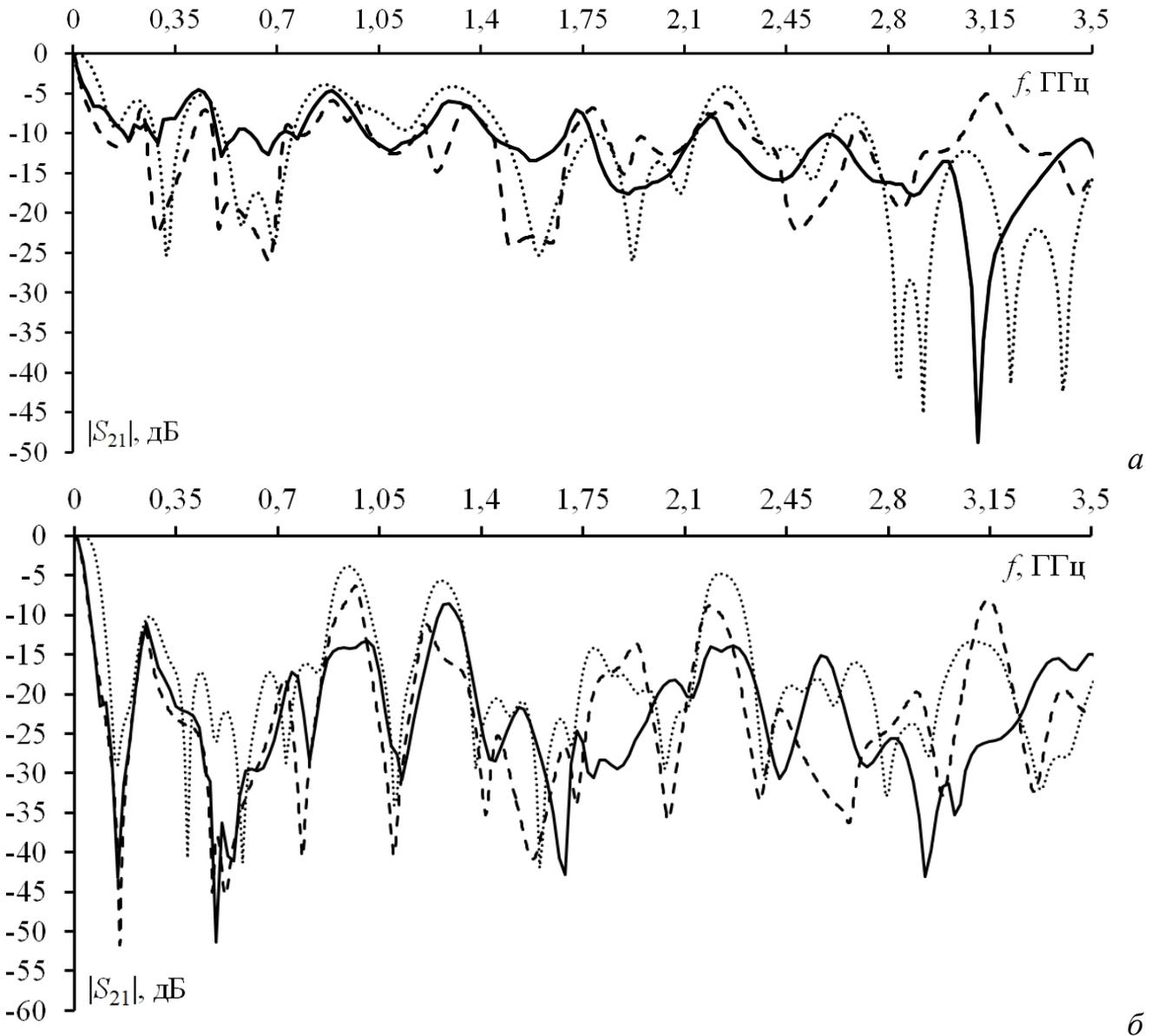


Рисунок 4.19 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  для МФ2 при  $R_2=R_4=50$  Ом (а), КЗ-XX (б) при квазистатическом (··) и электродинамическом моделировании (- -) и эксперименте (—)

По результатам натурального и вычислительного экспериментов в частотной области исследуемые структуры можно отнести к фильтрам нижних частот. Полосы пропускания и резонансные частоты для них сведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Полоса пропускания и резонансные частоты для МФ1 и МФ2

Частота, МГц	Квазистатика		Электродинамика		Эксперимент	
	50-50	XX-K3	50-50	XX-K3	50-50	XX-K3
$f_{cM\Phi 1}$	61	73	90	100	69	89
$f_{cM\Phi 2}$	20	27	77	81	24	27,5
$f_{r1M\Phi 1}$	–	156	601	160	629	149
$f_{r2M\Phi 1}$	696	471	720	480	849	489
$f_{r1M\Phi 2}$	291	156	320	150	289	149
$f_{r2M\Phi 2}$	676	476	690	390	669	489

Полоса пропускания МФ со слабой связью больше, чем с сильной. Изменение граничных условий на концах пассивного проводника позволяет увеличить полосу пропускания. По результатам экспериментального исследования наибольшая полоса пропускания составляет 89 МГц для МФ1 при XX-K3. Из таблицы 4.7 видно, что при XX-K3 частоты первого и второго резонансов уменьшаются.

Отличия результатов обусловлены различием значений электрических параметров реальных прототипов и их математических моделей. Так, например, могут отличаться значения  $\epsilon_r$  и  $\tan\delta$ , что сдвигает графики по частоте. Помимо этого, в моделировании не учитывалось влияние коаксиально-микроразрывных и коаксиальных переходов, которые вносят частотно-зависимые потери. Отличие же результатов квазистатического и электродинамического моделирования обусловлено ограничениями применяемых подходов и используемых методов.

С точки зрения фильтра нижних частот, конфигурация КЗ-XX в МФ1 и МФ2 более предпочтительна. Наличие ярко выраженных резонансов в рассогласованной конфигурации позволяет увеличить вносимые потери. Стоит отметить, что МФ1 и МФ2 обладают достаточно широкой полосой подавления, что актуально при подавлении широкополосных кондуктивных помех.

#### 4.1.5 Экспериментальное исследование каскадного соединения двух МФ

В разделе 2.4 показано, что достичь большего ослабления СКИ можно за счет каскадного соединения двух МФ с ХХ-КЗ и ХХ-КЗ на концах их пассивных проводников. Поэтому, важно экспериментальное подтверждение этого.

На рисунке 4.20 показаны результаты натурного и вычислительного экспериментов для временного отклика каскадного соединения двух МФ.

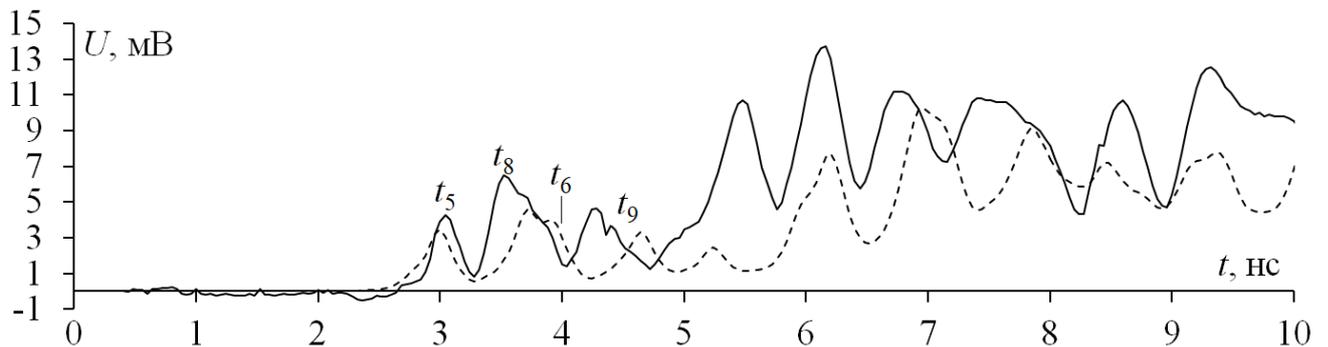


Рисунок 4.20 – Формы напряжения на выходе каскадного соединения двух МФ, полученные при эксперименте (—) и моделировании (- -)

Из рисунка 4.20 видно, что результаты эксперимента и моделирования согласуются. СКИ раскладывается на 4 первых импульса ( $t_5$ ,  $t_8$ ,  $t_6$ ,  $t_9$ ) с меньшими амплитудами. Однако  $t_8$  и  $t_6$  накладываются друг на друга, так что  $t_6$  при эксперименте почти не видно. Это связано с тем, что длительность входного воздействия больше, чем разность задержек мод ( $t_8$  и  $t_6$ ). Также в эксперименте видно, что на основной импульс  $t_9$  накладывается другой. Это может быть связано с переотражениями в линии. На выходе МФ присутствуют импульсы с амплитудой большей, чем у основных импульсов. Причина в том, что при изменении граничных условий на концах пассивного проводника появляются дополнительные импульсы с большей амплитудой. Поэтому ослабление будет оцениваться по значению  $U_{\max}$  дополнительных импульсов. Так, ослабление по результатам эксперимента составляет 10,4 раза. Значения напряжения основных импульсов мод и  $U_{\max}$ , а также разности задержек мод, полученные при эксперименте и моделировании, сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Значения напряжений основных ( $U_i$ , мВ) и максимального из дополнительных ( $U_{\max}$ , мВ) импульсов мод и разности задержек основных мод (нс/м) на выходе каскадного соединения двух МФ

Вид результата	$U_5$	$U_6$	$U_8$	$U_9$	$U_{\max}$	$\tau_8 - \tau_5$	$\tau_9 - \tau_6$
Моделирование	3,2	3,6	4,5	3,0	10,2	0,72	0,72
Эксперимент	3,9	5,4	6,0	4,6	13,6	0,56	0,56

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают возможность разложения СКИ в конце активного проводника при каскадном соединении и изменении граничных условий на концах пассивного проводника (XX-КЗ, XX-КЗ) двух МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости. Однако, ослабление оценивается дополнительными импульсами, которые возникают при изменении граничных условий на концах пассивных проводников двух МФ. Так, ослабление по результатам эксперимента составляет 10,4 раза.

## **4.2 Экспериментальное исследование модального фильтра на двухсторонней печатной плате с опорными проводниками, соединенными только на концах**

Здесь представлены результаты экспериментального подтверждения модальной фильтрации в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах.

### **4.2.1 Оптимизация для изготовления лабораторных макетов**

Для изготовления лабораторного макета выполнена оптимизация МФ на ДПП со всеми опорными проводниками (поперечное сечение и эквивалентная схема приведены в разделе 3.1.1). Для этого взят двухсторонний фольгированный стеклотекстолит общей толщиной 250 мкм ( $t=35$  мкм и  $h=180$  мкм). Оптимизировались ширина активного и пассивного проводников ( $w_1$ ) от 500 мкм до 4000 мкм и разнос проводников ( $s$ ) от 500 до 4000 мкм при  $l=12$  см. Ширина опорных проводников ( $w_2$ ) принята 800 мкм. Оптимизация выполнялась по

критерию уменьшения амплитуды напряжения на выходе МФ за счет выравнивания амплитуд импульсов и максимизации разности погонных задержек мод. В качестве воздействующего импульса при оптимизации использовался сигнал стробоскопического осциллографа в форме ступеньки. Для его преобразования в одиночный импульс и дальнейшего использования для моделирования, взята производная от формы напряжения. В результате, импульс имеет колоколообразную форму с амплитудой э.д.с. 0,634 В, временем фронта 14,6 пс, спада – 12 пс и плоской вершины – 4,7 пс (по уровням 0,1–0,9) и общей длительностью (по уровню 0,5) – 22 пс. Форма воздействия представлена на рисунке 4.21.

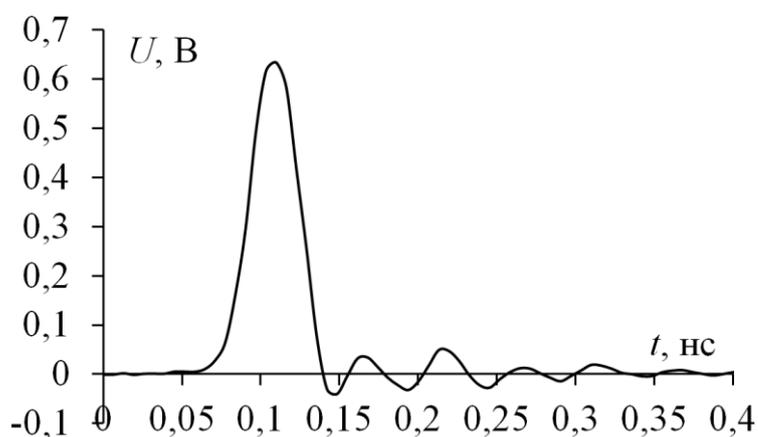


Рисунок 4.21 – Форма воздействующего э.д.с.

Выравнивание амплитуд и минимизация до 0,060 В достигнуты при  $w_1=700$  мкм и  $s=3450$  мкм. Результаты моделирования показаны на рисунке 4.22. Как видно, амплитуда выходного напряжения равна 0,06 В, а разность погонных задержек импульсов составляет 0,384 нс.

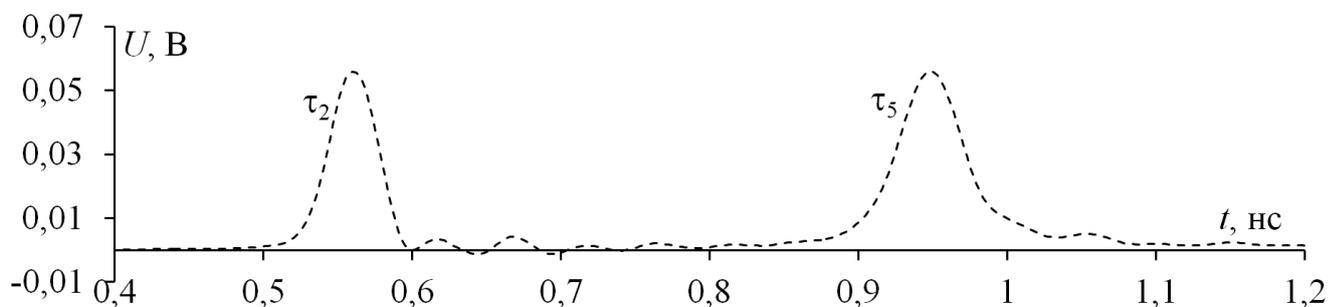


Рисунок 4.22 – Форма напряжения на выходе МФ

Для изготовления макета выбрана структура МФ без правого верхнего опорного проводника (поперечное сечение и эквивалентная схема приведены в

разделе 3.1.2.1), т.к. при заданных параметрах удаление верхнего проводника показало большее ослабление СКИ (в 1,5 раза). Однако, за счет оптимизации параметров МФ можно достичь большего ослабления СКИ. Поэтому её целесообразно выполнить.

Ранее выявлено, что увеличением связи между активным и пассивным проводниками, за счет уменьшения толщины диэлектрика и ширины опорных проводников, можно достичь большего ослабления СКИ. Поэтому для оптимизации и изготовления макета МФ взят самый тонкий двухсторонний фольгированный стеклотекстолит отечественного изготовителя общей толщиной 250 мкм при  $t=18$  и 35 мкм. Так, оптимизировалась ширина активного и пассивного проводников ( $w_1$ ) и  $s$  от 0,5 мм до 4 мм при  $h=180$  мкм,  $t=35$  мкм и  $h=214$  мкм,  $t=18$  мкм. Ширина опорных проводников ( $w_2$ ) принята 500 мкм. Оптимизация выполнялась по критерию уменьшения амплитуды напряжения на выходе МФ за счет выравнивания амплитуд импульсов. Данный критерий наиболее важен, поскольку именно амплитуда напряжения на выходе МФ определяет его основную характеристику: ослабление.

Результаты моделирования при  $h=180$  мкм и  $t=35$  мкм приведены в таблице 4.9. Получено 17 графиков, однако приведена лишь часть из них. Анализ  $\tau$  показывает близкие значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , а также  $\tau_3$  и  $\tau_4$ . Это означает одновременный приход мод к концу проводника, а значит, наложение импульсов. Разность  $\tau_1$  и  $\tau_2$  с увеличением  $w_1$  и  $s$  уменьшается, а  $\tau_3$  и  $\tau_4$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  увеличивается. С увеличением  $w_1$   $U_2$  монотонно увеличивается, а  $U_4$  – убывает. При  $s$  от 900 мкм до 4000 мкм наблюдается пересечение графиков, что соответствует равенству амплитуд (около 0,2 В) импульсов. С ростом  $s$  амплитуда импульсов меньше, а значение  $w_1$ , соответствующее равенству, больше. Видно, что при каждом значении  $s$  от 0,9 до 4 мм амплитуды выравниваются. Поэтому для поиска оптимального параметра  $w_1$  в точке, где  $U_2=U_4$ , оптимизация выполнялась с шагом 0,2 мм. В таблице 4.10 приведены значения  $w_1$  и  $s$ , при которых обеспечивается условие  $U_2=U_4$ . Так, при  $s=4$  мм и  $w_1=1,123$  мм минимальны и выравнены амплитуды импульсов на выходе МФ. Формы напряжения показаны на рисунке 4.23.

Таблица 4.9 – Зависимости  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  и  $U_2$ ,  $U_4$  от  $w_1$  при разных  $s$ , для  $h=180$  мкм и  $t=35$  мкм

$s$ , мм	$\tau_1$ (-), $\tau_2$ (-), $\tau_3$ (- -) и $\tau_4$ (- -)	$U_2$ (-) и $U_4$ (- -)
0,5		
1,5		
2,1		
2,9		
4		

Таблица 4.10 – Результаты оптимизации  $s$  и  $w_1$  при  $h=180$  мкм и  $t=35$  мкм

Значения параметров		Амплитуда напряжения, В
$s$ мм	$w_1$ , мм	
0,9	0,500	0,232
1,1	0,583	0,223
1,3	0,655	0,214
1,5	0,713	0,207
1,7	0,768	0,201
1,9	0,816	0,196
2,1	0,849	0,193
2,3	0,890	0,189
2,5	0,928	0,186
2,7	0,963	0,182
2,9	0,993	0,181
3,1	1,011	0,178
3,3	1,039	0,176
3,5	1,069	0,174
3,7	1,096	0,172
3,9	1,109	0,171
4	1,123	0,170

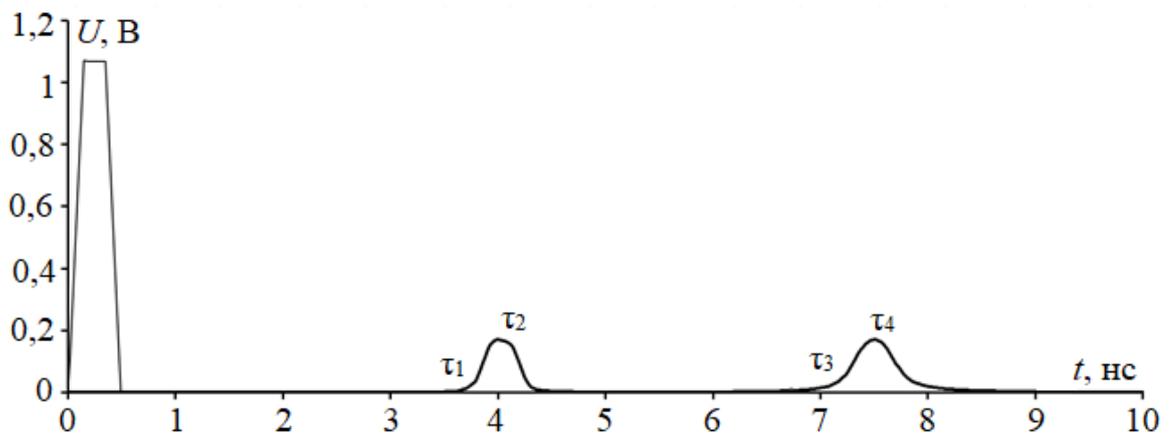


Рисунок 4.23 – Формы напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ  
при  $s=4$  мм и  $w_1=1,123$  мм

Результаты оптимизации при  $h=180$  мкм и  $t=35$  мкм показали, что при изменении  $s$  от 0,9 до 4 мм и  $w_1$  от 0,9 до 1,2 мм можно выровнять амплитуду импульсов. Поэтому при оптимизации с  $h=214$  мкм и  $t=18$  мкм значение  $w_1$  менялось от 0,5 до 2,1 мм. Результаты показаны в таблице 4.11. Видны близкие значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и  $\tau_4$ . Разность погонных задержек мод  $\tau_1$  и  $\tau_2$  с увеличением  $w$  и  $s$  уменьшается, а  $\tau_3$  и  $\tau_4$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  – увеличивается. С увеличением  $w_1$   $U_4$  уменьшается и увеличивается  $U_2$ .

Таблица 4.11 – Зависимости  $\tau_i$  и  $U_i$  от  $w_1$  при разных  $s$ , для  $h=214$  мкм и  $t=18$  мкм

$s$ , мм	$\tau_i$ : $\tau_1$ (-), $\tau_2$ (-), $\tau_3$ (- -) и $\tau_4$ (- - -)	$U_i$ : $U_2$ (-) и $U_4$ (- -)
0,5		
1,5		
2,1		
2,9		
4		

Также при изменении  $s$  от 0,9 до 4 мм амплитуды выравниваются. Поэтому выполнена более точная оптимизация, где  $U_2=U_4$ . В таблице 4.12 приведены значения параметров  $s$  и  $w_1$ , при которых обеспечивается выравнивание амплитуд импульсов ( $U_2=U_4$ ).

Таблица 4.12 – Результаты оптимизации при  $h=214$  мкм и  $t=18$  мкм

Значения параметров		Амплитуда импульсов $U_i$ , В
$s$ мкм	$w_1$ , мкм	
900	600	0,235
1100	695	0,227
1300	770	0,220
1500	838	0,213
1700	901	0,207
1900	957	0,203
2100	1007	0,198
2300	1054	0,195
2500	1097	0,191
2700	1136	0,189
2900	1176	0,186
3100	1211	0,183
3300	1245	0,181
3500	1278	0,178
3700	1308	0,177
3900	1337	0,175
4000	1351	0,174

В результате оптимизации параметров  $s$  и  $w_1$ , при  $t=18$  мкм и  $h=214$  мкм, получены значения  $s=4000$  мкм,  $w_1=1351$  мкм при которых  $U_2=U_4=0,174$  В. На рисунке 4.24 представлены формы напряжения на входе и выходе МФ.

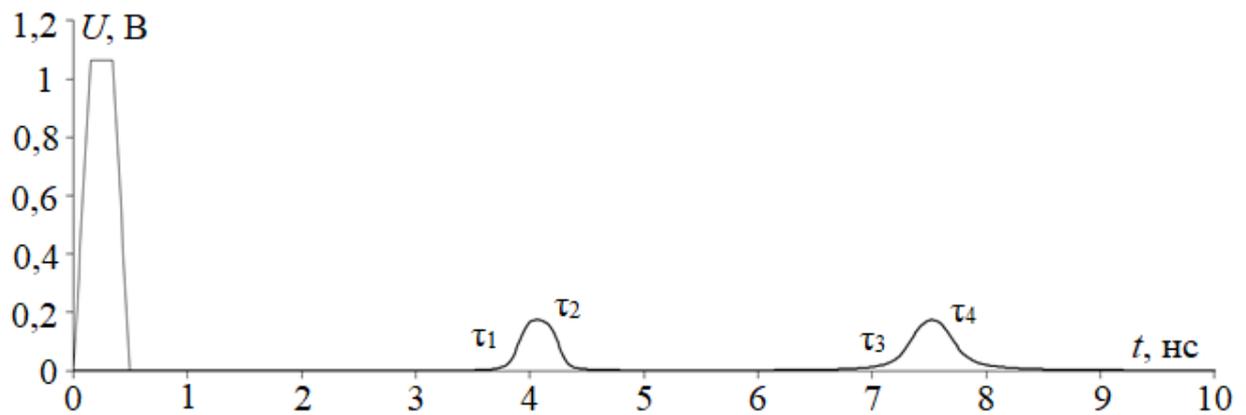


Рисунок 4.24 – Формы напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ,  
при  $s=4$  мм и  $w_1=1,351$  мм

Таким образом, более детально показаны результаты моделирования влияния  $t$ ,  $s$  и  $w_1$  на амплитуду импульсов разложения. Показано, что для заданных значений  $t$  и  $s$  есть такое значение  $w_1$ , при котором можно достичь выравнивания амплитуд импульсов на выходе МФ. Однако, минимальная амплитуда 0,17 В достигнута при  $s=4$  мм,  $w_1=1,123$  мм и  $t=35$  мкм.

#### 4.2.2 Оборудование для измерений

Для проведения экспериментального исследования во временной области, использовался цифровой стробоскопический осциллограф DSA8300 (рисунок 4.25а). С помощью дискретного модуля (80E04) на вход МФ подавался сигнал с линейно нарастающим фронтом. Шаг измерения по времени составил 1,25 пс. Для минимизации погрешности измерений выставлена максимально допустимая разрешающая способность стробоскопического осциллографа по осям напряжения и времени. Для сглаживания небольших колебаний и выбросов, к форме сигнала  $U(t)$  применена функция скользящего среднего. Количество точек усреднения принято равным 30. Из производных от временных откликов на ступенчатое воздействие  $U(t)$ , получены временные отклики на воздействие вида  $dU(t)/dt$  (рисунок 4.25б). Так как исследуемое устройство линейно, то для простоты восприятия сигнал нормирован к 0,63 В по максимальной амплитуде. Данное воздействие использовалась в качестве э.д.с. источника помехи (рисунок 4.25в). Оно

имеет колоколообразную форму со следующими параметрами: амплитуда – 0,634 В, время фронта – 14,6 пс, спада – 12 пс и плоской вершины – 4,7 пс (по уровням 0,1–0,9), общая длительность (по уровню 0,5) – 22 пс.

Для проведения экспериментального исследования в частотной области использовался векторный анализатор электрических цепей «Панорама» Р4226 (рисунок 4.26). Для повышения точности регистрации сигналов выполнена калибровка.

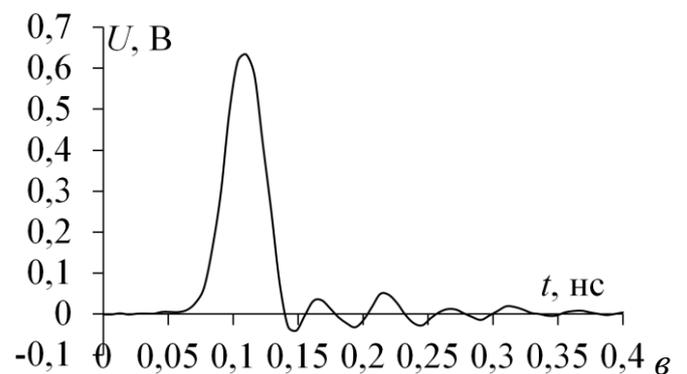
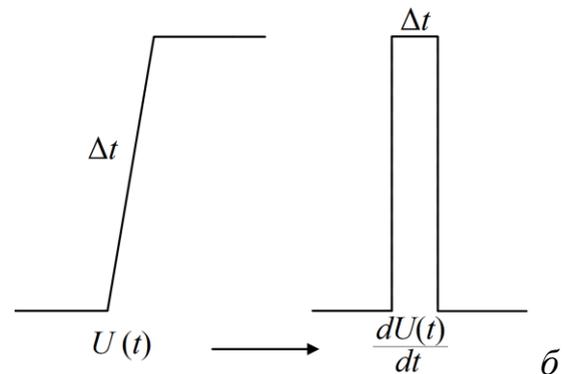
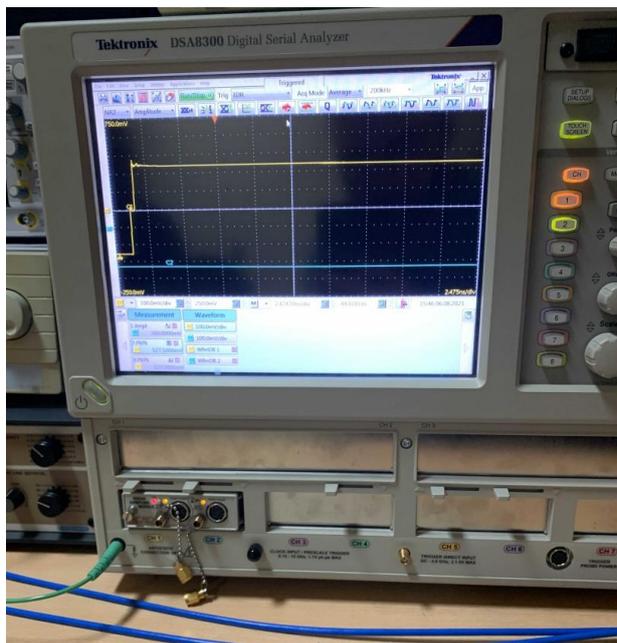


Рисунок 4.25 – Цифровой стробоскопический осциллограф DSA8300 (а),

пример взятия производной от входного воздействия (б)

и форма воздействующей э.д.с. (в)



Рисунок 4.26 – Векторный анализатор электрических цепей «Панорама» P4226

Результаты измерений сравнивались с результатами моделирования с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT.

### 4.2.3 Экспериментальное исследование модального фильтра со всеми опорными проводниками

Для изготовления макетов выполнена трассировка макета ПП МФ. Длина макета МФ принята равной 12 см (из-за гибкости макета ввиду малой толщины диэлектрика). После изготовления МФ проведен контроль геометрических параметров. С помощью увеличительного стекла с измерительной линейкой контролировались ширина печатных проводников и расстояние между ними. Получены реальные значения геометрических параметров, средние значения которых составили:  $w_1=738$  мкм,  $w_2=985$  мкм и  $s=3255$  мкм. На рисунке 4.27 показаны фотошаблоны макетов МФ, а на рисунке 4.28– изготовленный макет.

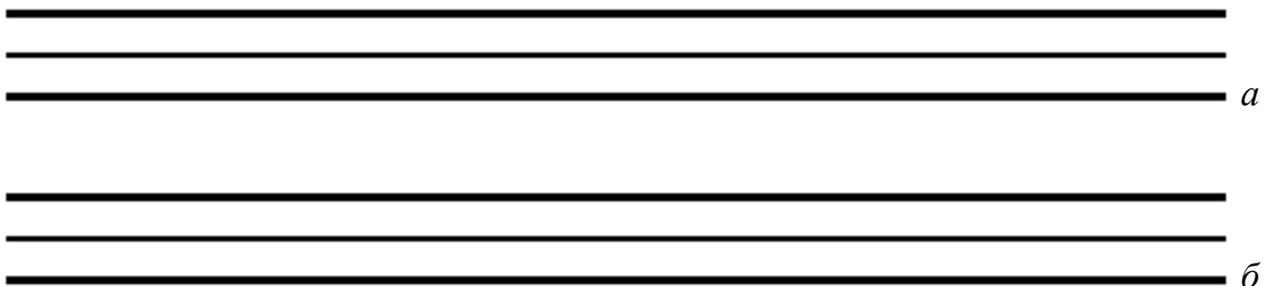


Рисунок 4.27 – Фотошаблоны верхнего (а) и нижнего (б) слоев макета МФ



Рисунок 4.28 – Фото верхнего (а) и нижнего (б) слоев макета МФ

На рисунке 4.29 показаны результаты эксперимента и моделирования во временной области. Из рисунка 4.29 видно, что СКИ раскладывается на 2 импульса с меньшими амплитудами ( $\tau_2$  и  $\tau_5$ ). Из-за большого значения разности задержек мод отсутствует наложение импульсов. Однако при измерениях наблюдается меньшая разность задержек мод. Это обусловлено тем, что реальное значение  $\varepsilon_r$  меньше принятого в моделировании. С изменением граничных условий (КЗ-ХХ) амплитуда импульсов становится меньше. Экспериментально подтверждается появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на конце пассивного проводника (на рисунке 4.29б дополнительные импульсы обозначены как 1 и 2). Из рисунка 4.29б видно, что при первом проходе сигнала по линии дополнительные импульсы отсутствуют, что объясняется отсутствием отражений от начала линии. Они появляются после третьего прохода (когда отраженный от конца линии сигнал (при первом проходе) вернулся в начало). Также видно, что амплитуда дополнительных импульсов меньше амплитуды основных импульсов мод. Следовательно, ослабление СКИ необходимо оценивать по значению  $U_{\max}$  именно основных импульсов мод. Так, при согласованном случае, по результатам эксперимента, достигнуто ослабление входного воздействия в 5,4 раза, а в случае ХХ-КЗ – 6,7 раза. Отклонение результатов эксперимента и моделирования может быть вызвано неучтенным влиянием коаксиально-микроразрывных и коаксиальных переходов. Амплитуды напряжения первых двух импульсов и разность задержек мод, полученные при эксперименте и моделировании, сведены в таблицу 4.13.

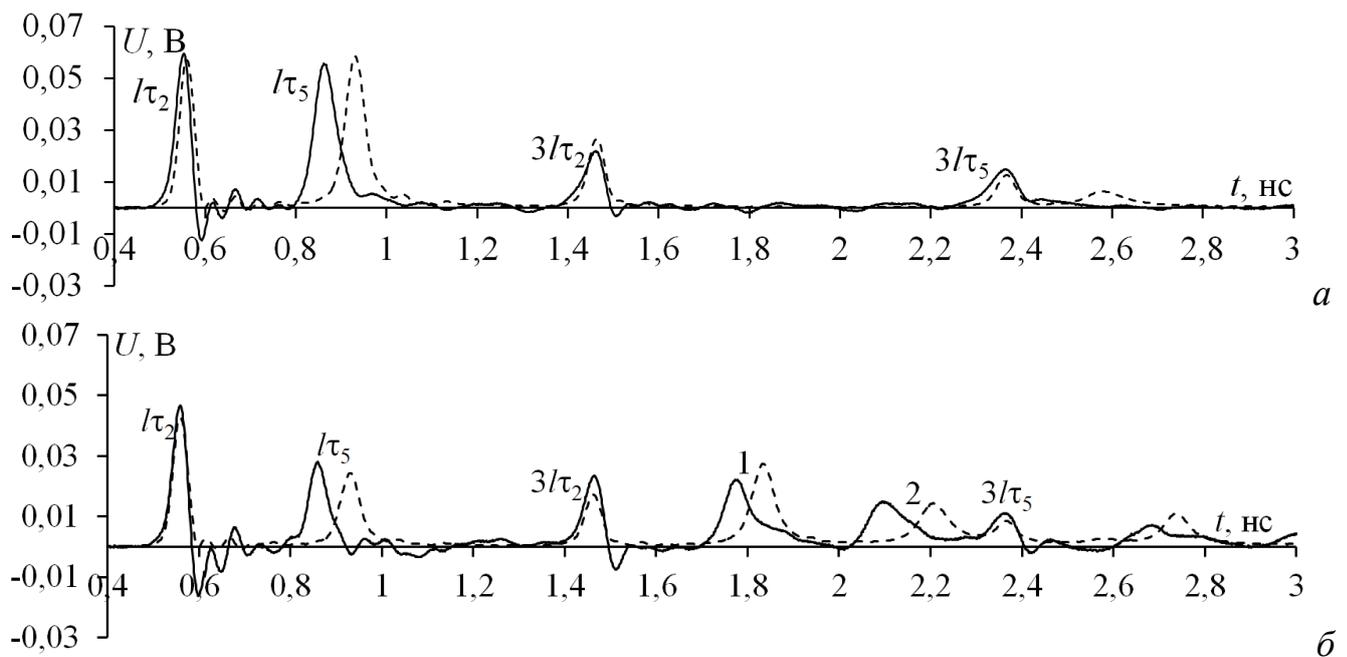


Рисунок 4.29 – Формы напряжения на выходе МФ при эксперименте (—), и моделировании (- -) при  $R_2=R_4=50$  Ом (а), и XX-K3 (б)

Для точного определения времени прихода дополнительных импульсов с помощью квазистатического моделирования вычислены погонные задержки и время прихода 5 основных мод (таблица 4.14). Получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов приведены в таблице 4.15, а напряжения дополнительных импульсов по результатам моделирования и эксперимента – в таблице 4.16.

Таблица 4.13 – Выходные характеристики исследуемого МФ

Параметры	Моделирование		Эксперимент	
	50-50	XX-K3	50-50	XX-K3
$U_2, \text{В}$	0,055	0,041	0,059	0,047
$U_5, \text{В}$	0,055	0,021	0,055	0,028
$\Delta\tau, \text{нс/м}$	3,7		3,1	

Таблица 4.14 – Погонные задержки (нс/м) и время (нс) прихода импульсов мод

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$	$l\tau_4$	$l\tau_5$	$l3\tau_1$	$l3\tau_2$	$l3\tau_3$	$l3\tau_4$	$l3\tau_5$
3,55	3,78	6,94	6,95	6,96	0,43	0,45	0,83	0,83	0,83	1,28	1,36	2,49	2,50	2,50

Таблица 4.15 – Параметры дополнительных импульсов при КЗ-XX

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

Таблица 4.16 – Амплитуды ( $U_i$ ) дополнительных импульсов на выходе МФ при КЗ-ХХ

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

На рисунке 4.30 показаны результаты эксперимента и моделирования частотной зависимости  $|S_{21}|$ . Полосы пропускания ( $f_c$ ) (по уровню минус 3 дБ) и резонансные частоты ( $f_i$ ) сведены в таблицу 4.22. Из приведенных результатов видно, что изменение граничных условий позволяет увеличить полосу пропускания. По результатам эксперимента видно, что если в согласованном случае полоса пропускания составляет 120 МГц, то в случае КЗ-ХХ полоса пропускания 150 МГц. В конфигурации КЗ-ХХ частоты первого и второго резонансов уменьшаются. Небольшие отличия результатов обусловлены различием значений электрофизических параметров реальных прототипов и их математических моделей. Так, могут отличаться значения  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$ , что сдвигает графики по частоте. Помимо этого, в моделировании не учитывалось влияние коаксиально-микроразъемных и коаксиальных переходов, которые вносят частотно-зависимые потери.

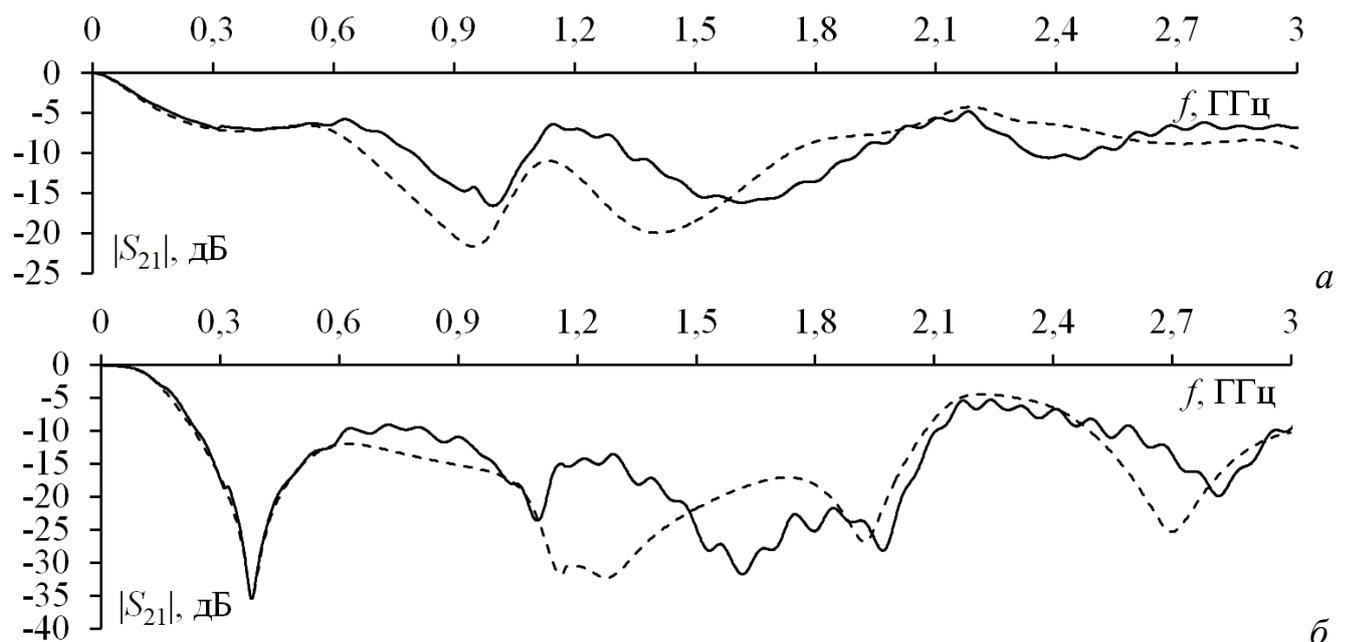


Рисунок 4.30 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при эксперименте (—) и моделировании (- -) при  $R_2=R_4=50$  Ом (а) и КЗ-ХХ (б)

Таблица 4.17 – Полосы пропускания и резонансные частоты МФ (МГц)

Частота, 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

В итоге, экспериментально показана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП. Показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс раскладывается на два импульса при  $l=12$  см. По результатам эксперимента ослабление СКИ составляет 6,7 раза. Изменение граничных условий позволяет увеличить полосу пропускания МФ до 150 МГц. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях хорошо согласуются.

#### 4.2.4 Экспериментальное исследование модального фильтра без верхнего опорного проводника

Оптимизация параметров приведена в разделе 4.2.1 по ее результатам для проведения натурального эксперимента изготовлен макет МФ с параметрами:  $w_2=500$  мкм,  $w_1=1123$  мкм,  $s=4000$  мкм,  $h=180$  мкм,  $t=35$  мкм.

Для изготовления макета выполнена трассировка макета ПП МФ. Размер платы составляет  $17 \times 19$  см. На рисунке 4.31 показан фотошаблон макета МФ и на рисунке 4.32 изготовленный макет.

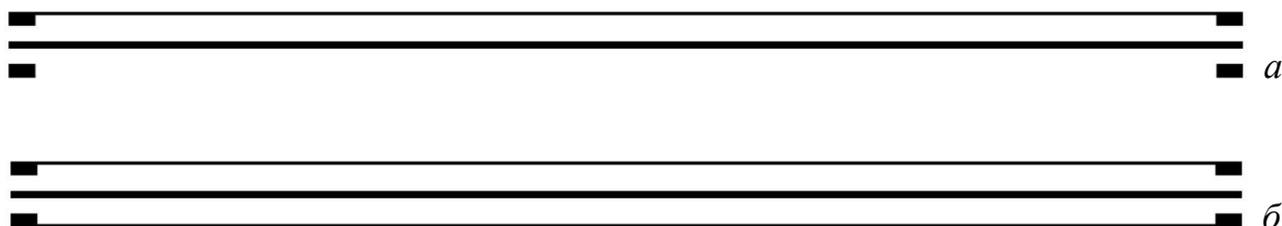


Рисунок 4.31 – Фотошаблоны верхнего (а) и нижнего (б) слоев макета МФ

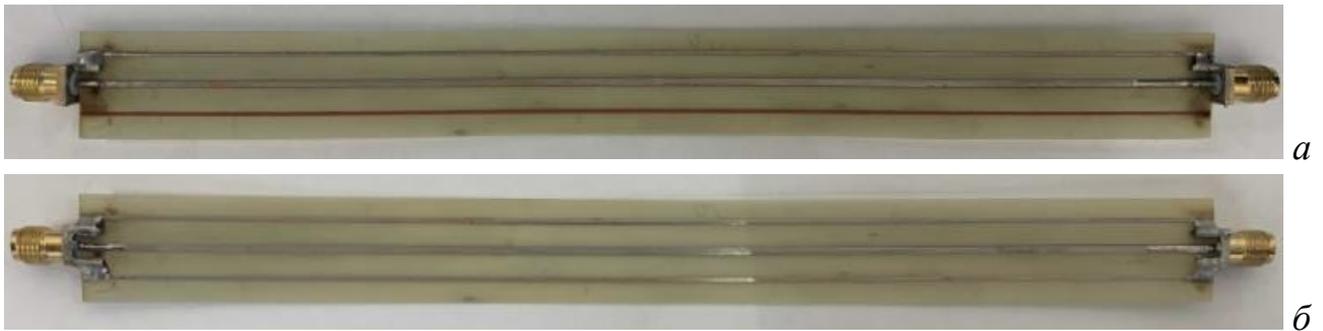


Рисунок 4.32 – Фото верхнего (а) и нижнего (б) слоев макета МФ

После изготовления МФ проведен контроль геометрических параметров. С помощью увеличительного стекла с измерительной линейкой контролировались ширина печатных проводников и расстояние между ними. Получены реальные значения геометрических параметров, средние значения которых составили:  $w_1=1181$  мкм,  $w_2=533$  мкм и  $s=3872$  мкм.

На рисунке 4.33 показаны результаты эксперимента и моделирования во временной области. Результаты хорошо согласуются по форме и времени прихода импульсов. Так, рисунок 4.33 подтверждает результаты моделирования, когда импульсы мод 1 и 2, а также 3 и 4, приходят почти одновременно, а ослабление МФ оценивается импульсами мод 2 и 4. Следовательно, СКИ раскладывается на два основных импульса с меньшими амплитудами ( $\tau_2$  и  $\tau_4$ ). Из-за большой разности задержек мод отсутствует наложение импульсов. Однако, в эксперименте наблюдается меньшая разность задержек мод из-за меньшего реального значения  $\epsilon_r$ .

Амплитуда импульсов становится меньше с изменением граничных условий на пассивном проводнике. Появились дополнительные импульсы, но их амплитуды не больше основных. Так, при согласованном случае, по результатам эксперимента, достигнуто ослабление входного воздействия в 6,6 раза, а в случае ХХ-КЗ – 7,7 раза. Значения напряжения импульсов и разность задержек мод, полученные при эксперименте и моделировании, сведены в таблицу 4.18.

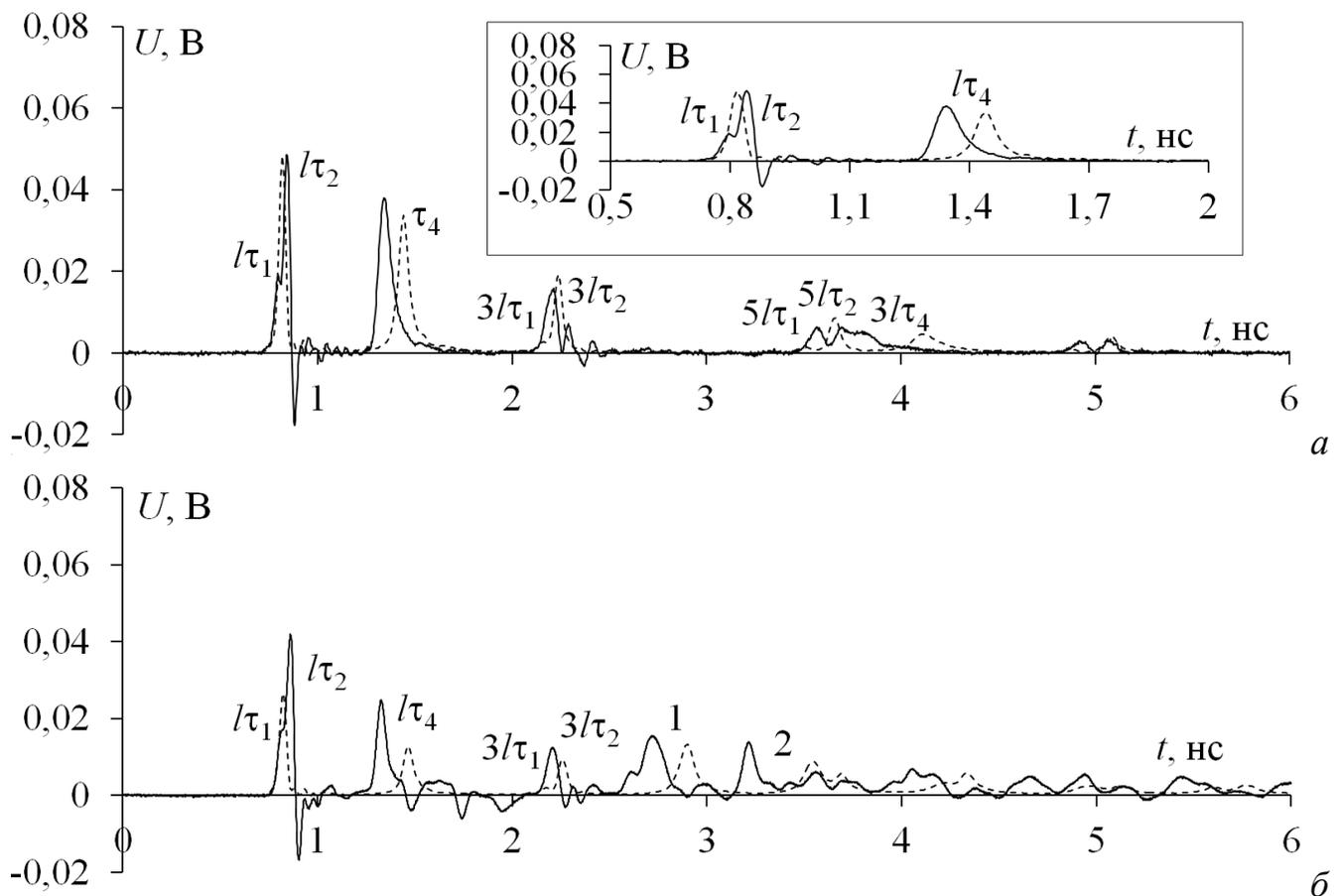


Рисунок 4.33 – Формы напряжения на выходе МФ при эксперименте (—),  
и моделировании (---) при  $R_2=R_3=50$  Ом (а) и КЗ-XX (б)

Таблица 4.18 – Амплитуды и разности погонных задержек импульсов на выходе МФ 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	

Детальный анализ рисунка 4.33 показал наличие дополнительных импульсов (обозначены как 1 и 2), которые появляются при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. В таблице 4.19 приведены напряжения дополнительных импульсов по результатам моделирования и эксперимента. Из-за наложения импульсов сложно определить другие дополнительные импульсы, однако они явно есть.

Таблица 4.19 – Амплитуды ( $U_i$ ) дополнительных импульсов на выходе МФ при КЗ-ХХ

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

Для оценки определения времени прихода дополнительных импульсов с помощью квазистатического моделирования вычислены погонные задержки и время прихода четырех основных мод. Результаты приведены в таблице 4.20. Получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов приведены в таблице 4.21.

Таблица 4.20 – Погонные задержки (нс/м) и время (нс) прихода импульсов мод

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$	$l\tau_4$	$l3\tau_1$	$l3\tau_2$	$l3\tau_3$	$l3\tau_4$
3,62	3,77	6,65	7,11	0,69	0,72	1,26	1,35	2,06	2,15	3,79	4,05

Таблица 4.21 – Параметры дополнительных импульсов при КЗ-ХХ

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

Из рисунка 4.33 видно, что результаты эксперимента и моделирования во временной области хорошо согласуются по форме и времени прихода импульсов, хотя, в эксперименте меньше разность задержек мод. Отклонение результатов моделирования и эксперимента, рассчитанное как:  $(|X_M - X_{\text{Э}}| / |X_M + X_{\text{Э}}|) \cdot 100\%$ , составляет 10,7%. Это обусловлено тем, что реальное значение  $\epsilon_r$  меньше принятого в моделировании. Наблюдается некоторое отклонение результатов эксперимента и моделирования по амплитудам импульсов, что может быть вызвано неучтенным влиянием коаксиально-микроразветвляющихся и коаксиальных переходов. Отклонения составляют при согласованном случае для  $U_2 - 0\%$ ,  $U_4 - 5,7\%$  и при КЗ-ХХ  $U_2 - 24,2\%$ ,  $U_4 - 33,3\%$ .

На рисунке 4.34 показаны результаты эксперимента и моделирования для частотной зависимости  $|S_{21}|$ . Полосы пропускания (по уровню минус 3 дБ) и резонансные частоты сведены в таблицу 4.22. Из представленных результатов видно, что изменение граничных условий позволяет увеличить полосу пропускания. Так, по результатам эксперимента видно, что если в согласованном

случае полоса пропускания составляет 63 МГц, а в случае КЗ-ХХ – 70,50 МГц. Частоты первого и второго резонансов уменьшаются при КЗ-ХХ.

Также хорошо согласуются и результаты, полученные в частотной области. Отклонение для полосы пропускания составляет 7,6% для согласованного случая и 1,4% для КЗ-ХХ. Небольшие отличия результатов обусловлены различием значений электрических параметров реальных прототипов и их математических моделей. Так, например, могут отличаться значения для  $\epsilon_r$  и  $\tan\delta$ , что сдвигает графики по частоте. Помимо этого, в моделировании также не учитывалось влияние коаксиально-микроразрывных и коаксиальных переходов, которые вносят частотно-зависимые потери.

В итоге, экспериментально показана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП с удалением верхнего опорного проводника. Показано, что изменение граничных условий позволяет достичь большего ослабления СКИ и увеличить полосу пропускания МФ. Так, по результатам эксперимента, ослабление входного воздействия, при КЗ-ХХ, составляет 7,7 раза, а полоса пропускания 70,5 МГц. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях согласуются.

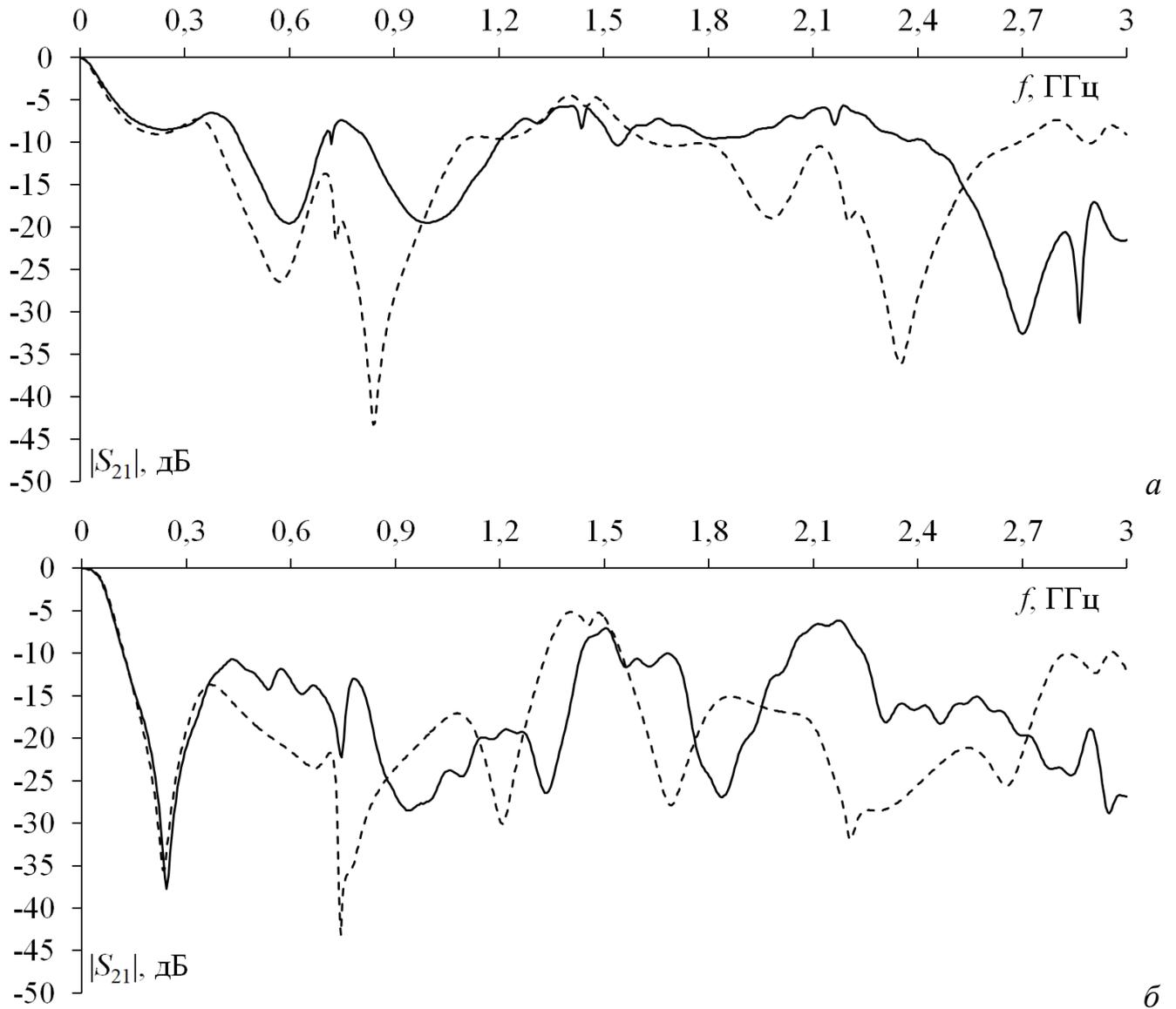


Рисунок 4.34 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при эксперименте (—),  
и моделировании (- -) при  $R_2=R_3=50$  Ом (а) и КЗ-XX (б)

Таблица 4.22 – Полоса пропускания и резонансные частоты при моделировании и эксперименте

Частота, 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

#### 4.2.5 Экспериментальное подтверждение ослабления сверхкороткого импульса с помощью двух вырезов в копланарной полосковой линии

В разделе 3.1.1 показано с помощью моделирования, что два выреза в опорной плоскости КПЛ способны обеспечить ослабление СКИ. Между тем представляет интерес экспериментальное подтверждение возможности такого ослабления.

Для проведения измерений изготовлен макет. В качестве подложки макета использован ламинат RO4350B с  $\epsilon_r=3,66$  и  $\text{tg}\delta=0,0031$ . Геометрические параметры макета:  $h=250$  мкм,  $t=18$  мкм,  $w_1=600$  мкм,  $s=270$  мкм.

Выполнена трассировка с общей длиной проводников 53 мм. На рисунке 4.35 представлены фотошаблоны верхнего слоя, а также общий двумерный вид. Нижний слой представляет собой сплошной полигон. Размеры ПП составили  $20 \times 53$  мм. Полигон на верхнем слое соединен с полигоном на нижнем слое через металлизированные переходные отверстия. Присоединение переходов осуществляется с помощью пайки 4 выводов на верхнем и нижнем слоях. Изготовленный макет КПЛ на рисунке 4.36.

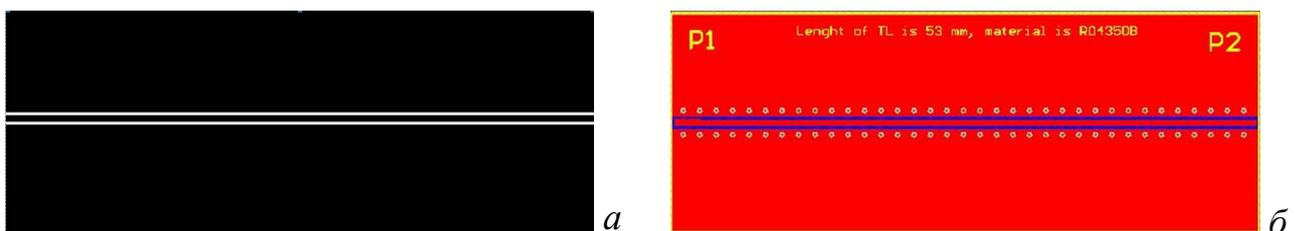


Рисунок 4.35 – Фотошаблон верхнего слоя (а) и двумерный вид (б) макета

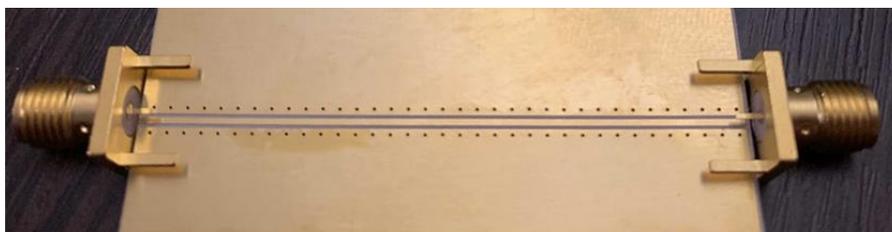


Рисунок 4.36 – Изготовленный макет КПЛ

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

Результаты эксперимента и моделирования во временной области приведены на рисунке 4.37. Видно, что при эксперименте максимальное напряжение на выходе КПЛ составило 0,285 В, а МФ – 0,131 В. При моделировании эти значения составили 0,272 В и 0,125 В соответственно. Так, по результатам эксперимента ослабление МФ составило 2,5 раза.

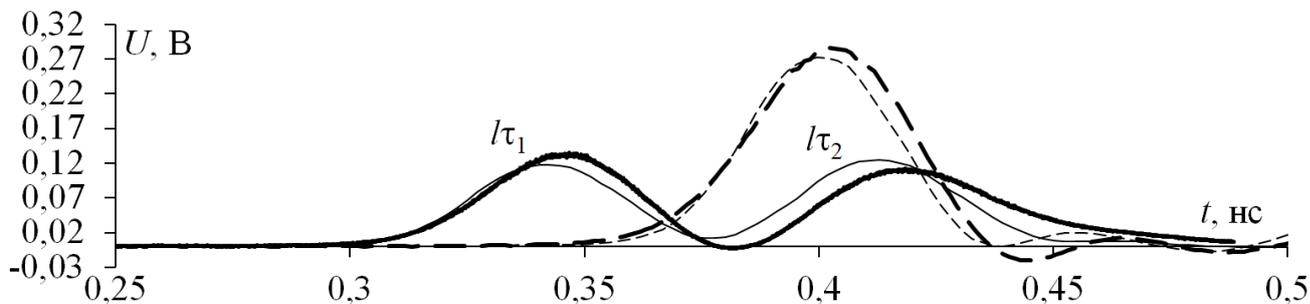


Рисунок 4.37 – Формы напряжения на выходах КПЛ при эксперименте (---) и моделировании (—) и МФ при эксперименте (-) и моделировании (-)

В результате, экспериментально показано, что два выреза в опорной плоскости КПЛ способны обеспечить ослабление СКИ (по результатам эксперимента ослабление составило 2,5 раз).

### 4.3 Основные результаты раздела

1. Показано, что для типовых параметров материала подложки и увеличения связи между активным и пассивным проводниками МФ при сопротивлениях на его концах 50 Ом можно достичь ослабления в 4,7 раза, а при КЗ-ХХ – около 10 раз.

2. Разработаны макеты МФ со слабой и сильной связями между проводниками. Показана возможность минимизации амплитуды СКИ за счет увеличения связи между активным и пассивным проводниками, а также граничных условий на концах пассивного проводника. Максимальное ослабление (в эксперименте 7,8 раза) наблюдается в конфигурации МФ с сильной связью при граничных условиях КЗ-ХХ. Появление дополнительных импульсов доказано экспериментально. Показано, что их задержки определяются линейной комбинацией погонных задержек мод МФ, умноженных на его длину. Для

подтверждения результатов экспериментального исследования выполнены квазистатическое и электродинамическое моделирование. Результаты натурального и вычислительных экспериментов хорошо согласуются. Показано, что уменьшение связи между проводниками и изменение граничных условий на ХХ-КЗ на концах пассивного проводника увеличивают полосу пропускания. По результатам экспериментального исследования наибольшая полоса пропускания составляет 89 МГц для МФ со слабой связью.

3. Выполнена оптимизация МФ на ДПП со всеми опорными проводниками. Выравнивание амплитуд и минимизация до 0,06 В достигнуты при  $w_1=700$  мкм и  $s=3450$  мкм.

4. Выполнена оптимизация МФ на ДПП без верхнего опорного проводника. Показано, что для заданных значений  $t$  и  $s$  есть такое значение  $w$ , при котором можно достичь выравнивания амплитуд импульсов на выходе МФ. Минимальная амплитуда 0,17 В достигнута при  $s=4$  мм,  $w_1=1,123$  мм и  $t=35$  мкм.

5. Разработан макет МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах. Экспериментально показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс раскладывается при  $l=12$  см. Изменение граничных условий позволяет увеличить ослабление и полосу пропускания МФ. Так, по результатам эксперимента ослабление СКИ составляет 6,7 раза, а полоса пропускания 150 МГц. Экспериментально показано появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Для подтверждения результатов экспериментального исследования выполнено квазистатическое моделирование. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях хорошо согласуются.

6. Разработан макет МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах, без верхнего опорного проводника. Экспериментально показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс раскладывается при  $l=19$  см. Показано, что изменение граничных условий позволяет большего ослабления СКИ и увеличить полосу пропускания МФ. Так, по результатам эксперимента ослабление входного воздействия при КЗ-ХХ составляет 7,7 раза при полосе пропускания 70,5 МГц.

Также, показано появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Время прихода этих импульсов определяется линейной комбинацией погонных задержек мод, умноженных на длину линии. Для подтверждения результатов экспериментального исследования выполнено квазистатическое моделирование. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях хорошо согласуются.

7. Выполнен эксперимент, подтверждающий, что два выреза в опорной плоскости КПЛ способны обеспечить ослабление СКИ. Экспериментально показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс, раскладывается при  $l=53$  мм. По результатам эксперимента ослабление составило 2,5 раза. Для подтверждения результатов эксперимента выполнено квазистатическое моделирование. Результаты согласуются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Результаты исследования

1. МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости, оптимизированный по двум критериям, позволяет достичь ослабления СКИ при сопротивлениях 50 Ом на концах пассивного проводника в 4,7 раза, а при граничных условиях КЗ-ХХ – около 10 раз (здесь и далее по отношению к половине э.д.с.).

2. Введение асимметрии за счет приближения одного опорного проводника к пассивному позволило разложить импульсы двух быстрых мод, которые при симметрии сливались. Уменьшение ширины пассивного проводника позволило разложить импульсы двух быстрых мод, а активного – выровнять амплитуды двух основных импульсов и уменьшить амплитуду напряжения на выходе.

3. Выявлено, что с увеличением асимметрии появляются дополнительные импульсы, задержки которых определяются линейной комбинацией погонных задержек мод, умноженных на длину МФ. Показано, что при изменении граничных условий на концах пассивного проводника появляются дополнительные импульсы, амплитуда которых больше амплитуды основных импульсов мод.

4. Показана возможность разложения СКИ при каскадном соединении двух МФ одинаковой длины. Достигнуто уменьшение амплитуды на выходе в 12,5 раза при сопротивлениях 50 Ом на концах пассивных проводников и в 19 раз – при ХХ-КЗ, ХХ-КЗ.

5. Разработаны макеты МФ со слабой и сильной связями между проводниками. Максимальное ослабление (в эксперименте 7,8 раза) наблюдается в конфигурации МФ с сильной связью при граничных условиях КЗ-ХХ. Появление дополнительных импульсов доказано экспериментально. Показано, что их задержки определяются линейной комбинацией погонных задержек мод, умноженных на длину МФ. Показано, что уменьшение связи между проводниками

и изменение граничных условий на ХХ-КЗ на концах пассивного проводника увеличивают полосу пропускания (в эксперименте до 89 МГц).

6. Представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения МФ на ДПП для двух способов соединения опорных проводников между собой. При соединении только на концах, достигнуто ослабление СКИ при сопротивлениях 50 Ом на концах пассивного проводника в 2 раза, при ХХ-КЗ – 5,6 раза, а разность погонных задержек мод составила 2,35 нс/м. При соединении вдоль всей длины достигнута разность погонных задержек мод 2,42 нс/м и ослабление 3 раза в согласованном случае и 6 раз при КЗ-ХХ или ХХ-КЗ на концах пассивного проводника.

7. Исследовано влияние удаления одного и двух опорных проводников на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах. Выполнена оптимизация МФ на ДПП без правого верхнего опорного проводника. Ослабление СКИ составило 5,8 раза.

8. Исследовано влияние экрана на разложение СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными вдоль всей длины. Показано, что при соединении опорных проводников с экраном достигается примерно одинаковое разложение СКИ вне зависимости от количества опорных проводников.

9. Рассмотрено появление дополнительных импульсов в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах и вдоль всей длины. Также, их появление оценено для МФ с опорными проводниками, соединенными только на концах, при удалении из него одного и двух опорных проводников.

10. Показано, что оптимизация МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями позволяет достичь максимизации разности максимальной и минимальной задержек импульсов, выровнять разность задержек двух пар мод, максимизировать ослабление исходного СКИ: 4 раза в согласованном случае и 10 раз при ХХ-КЗ на концах всех пассивных проводников.

11. Показана возможность разложения СКИ в исходном МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями и в его конфигурациях с удалением одного и двух пассивных проводников. Оптимизация МФ на ДПП с лицевыми и боковыми

связями без нижнего пассивного проводника позволила максимизировать разность максимальной и минимальной задержек импульсов, близких значений разностей задержек двух пар мод и выровнять амплитуды импульсов 3 и 6.

12. Показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричном МФ на ДПП. Достигнуто ослабление в 4 раза при нагрузках на концах всех проводников по 50 Ом и 5 раз при ХХ-КЗ.

13. Выполнен сравнительный анализ МФ на ДПП, выявивший ряд достоинств и недостатков каждого из устройств по ряду признаков.

14. Разработан макет МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах. Экспериментально показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс раскладывается при длине МФ 12 см, изменение граничных условий позволяет получить ослабление 6,7 раза и полосу пропускания МФ 150 МГц.

15. Разработан макет МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах, без верхнего опорного проводника. Экспериментально показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс раскладывается при длине МФ 19 см, изменение граничных условий позволяет достичь большего ослабления СКИ и увеличить полосу пропускания МФ: 7,7 раза при КЗ-ХХ и 70,5 МГц. Также, показано появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Время прихода этих импульсов определяется линейной комбинацией погонных задержек мод, умноженных на длину линии.

16. Выполнен эксперимент, подтверждающий, что два выреза в опорной плоскости КПЛ способны обеспечить ослабление СКИ: при его общей длительности 22 пс и длине линии 53 мм ослабление составило 2,5 раза.

Таким образом, в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» ВАК, в работе решена задача совершенствования защиты РЭА от СКИ с помощью МФ на ДПП, имеющая значение для развития технических наук в части разработки научных и технических основ проектирования и конструирования радиотехнических устройств, согласно области «Разработка

научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств» исследований паспорта специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

### **Рекомендации**

1. Все рассмотренные МФ могут быть использованы для защиты РЭА от СКИ по цепям питания и сигнальным цепям.

2. МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости и МФ на ДПП могут быть использованы для защиты бортовой РЭА космического аппарата от СКИ в цепях питания, так как они обладает меньшей массой и габаритами, а также обеспечивают большую разность задержек мод.

3. Для уменьшения массы и стоимости МФ возможно удаление одного или двух пассивных и опорных проводников, а также резисторов.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Интеграция рассмотренных МФ в реальные ДПП.
2. Исследование МФ на керамической подложке, что позволит увеличить разность погонных задержек мод и уменьшить длину МФ.
3. Исследование влияния магнетодиэлектрика на ослабление СКИ.
4. Более детальное исследование влияния экрана на ослабление СКИ.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

КЗ	Короткое замыкание
КП	Контактная площадка
КПЛ	Копланарная полосковая линия
МПЛП	Многопроводная линия передачи
МПЛ	Микрополосковая линия передачи
МР	Модальное резервирование
МФ	Модальный фильтр
ПО	Программное обеспечение
ПП	Печатная плата
РЭА	Радиоэлектронная аппаратура
СКИ	Сверхкороткий импульс
ХХ	Холостой ход
ЭМП	Электромагнитные помехи
ЭМС	Электромагнитная совместимость

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Albertson, R.T. Overview of electromagnetic interference / R.T. Albertson, J. Arthur, M.H. Rashid // 38<sup>th</sup> North American Power Symposium. – Carbondale, IL, USA, 17–19 September, 2006. – P. 263–266.
2. Kaur, M. Electromagnetic interference / M. Kaur, S. Kakar, D. Mandal // 3<sup>rd</sup> International Conference on Electronics Computer Technology. – Kanyakumari, India, 8–10 April, 2011. – Vol. 4. – P. 1–5.
3. Sabath, F. Classification of electromagnetic effects at system level // In Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9. – Springer, New York, NY, 2010. – C. 325–333.
4. Gold, S.H. Review of high-power microwave source research / S.H. Gold, G.S. Nusinovich // Review Science Instrument. – 1997. – Vol. 68, no.11. – P. 3945–3974.
5. Sabath, F. Risk potential of radiated HPEM environments / F. Sabath, H. Garbe // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Austin, USA. – 17–21 August, 2009. – P. 226–231.
6. Aiello, G.R. Ultra-wideband wireless systems / G.R. Aiello, G.D. Rogerson // IEEE microwave magazine. – 2003. – Vol. 4, no. 2. – P. 36–47.
7. Хоанг, Л.Ч. Аналитический обзор по исследованиям влияния преднамеренного электромагнитного воздействия на беспроводные сети / Л.Ч. Хоанг, Р.В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5, №. 1. – С. 114.
8. Cai, X. Analysis of complexity in battlefield electromagnetic environment / X. Cai, J. Song // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – Xi'an, China. 25–27 May, 2009. – P. 2440–2442.
9. Delsing, J. Susceptibility of sensor networks to intentional electromagnetic interference / J. Delsing, J. Ekman, J. Johansson, S. Sundberg, M. Backstrom, T. Nilsson // 17<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Singapore. 27 February–3 March, 2006. – P. 172–175.

10. Быстров, Р.П. Электромагнитные системы и средства преднамеренного воздействия на физические и биологические объекты // Р.П. Быстров, В.Г. Дмитриев, А.А. Потапов, Ю.М. Перунов, В.А. Черепенин // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2014. – Т. 6, №. 2. – С. 129–169.
- 11 Ключник, А.В. Исследование стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, №. 3. – С. 370–374.
12. Giri, D.V. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME) / D.V. Giri, F.M. Tesche // IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, no. 3. – P. 322–328.
13. Hayashi, Y.I. Fundamental study on fault occurrence mechanisms by intentional electromagnetic interference using impulses / Y.I. Hayashi, N. Homma, T. Mizuki, T. Aoki, H. Sone // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Taipei, Taiwan. 26–29 May, 2015. – P. 585–588.
14. Mansson, D. Methodology for classifying facilities with respect to intentional EMI / D. Mansson, R. Thottappillil, M. Backstrom // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2009. – Vol. 51, no. 1. –P. 46–52.
- 15 Radasky, W.A. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI) / W.A. Radasky, C.E. Baum, M.W. Wik // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, no.3. – P. 314–321.
16. Wik, M.W. The threat of intentional electromagnetic interference / M.W. Wik, W.A. Radasky, R.L. Gardner // Proceedings. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. CEEM'2000 (IEEE Cat. No. 00EX402). – Shanghai, China. 7 May, 2000. – P. 17–19.
17. Radasky, W.A. Fear of frying electromagnetic weapons threaten our data networks. Here's how to stop them // IEEE Spectrum. – 2014. Vol. 51, no.9. – P. 46–51.

18. Sabath, F. What can be learned from documented Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) attacks? // XXX<sup>th</sup> URSI General Assembly and Scientific Symposium. – Istanbul, Turkey. 13–20 August, 2011. – P. 1–4.
19. Слюсар, В. Генераторы супермощных электромагнитных импульсов в информационных войнах // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2002. – № 5. – С. 60–67.
20. Backstrom, M.G. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: Summary of test experience / M.G. Backstrom, K.G. Lovstrand // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46, no. 3. – P. 396–403.
21. Prather, W.D. Survey of worldwide high-power wideband capabilities / W.D. Prather, C.E. Baum, R.J. Torres, F. Sabath, D. Nitsch // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46, no. 3. – P. 335–344.
22. Иммореев, И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 1. – С. 5–31.
23. Газизов, Т.Р. Электромагнитная совместимость: преднамеренные силовые электромагнитные воздействия: учебное пособие / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – 114 с.
24. Månsson, D. Intentional EMI against critical infrastructures, a discussion on mitigation philosophy / D. Månsson, M. Bäckström, R. Thottappillil // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Beijing, China. 12–16 April, 2010. – P. 134–137.
25. Hayes, P.R. Electromagnetic interference risk analysis / P.R. Hayes, E. Hanada, C. Bakuzonis // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. – 2008. – Vol. 27, no. 6. P. 39–41.
26. Parfenov, Y.V. Conducted IEMI threats for commercial buildings / Y.V. Parfenov, L.N. Zdoukhov, W.A. Radasky, M. Ianoz // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46, no.3. – P. 404–411.

27. Бердышев, А.В. Влияние воздействия мощных СВЧ-импульсов на УКВ-радиостанцию // Антенны. – 2001. – №. 5. – С. 57–60.
28. Sanders, F.H. Effects of RF Interference on Radar Receivers / F.H. Sanders, R.L. Sole, B.L. Bedford, D. David Franc // NTIA Report. – 2006. – No. 06-444.
29. Arnesen, O.H. High Power Microwave Effects on Civilian Wireless Equipment / O.H. Arnesen, E. Krogager, M. Bäckström, S. Bø-Sande, J. Godø, S. Härkönen // EMC Europe Workshop, Rome, September. – 2005. – Vol. 5.
30. Юшков, Ю.Г. Экспериментальное исследование воздействия СВЧ импульсов на работу персонального компьютера / Ю.Г. Юшков, П.Ю. Чумерин, С.Н. Артёменко, С.А. Новиков, Д.В. Зеленцов // Радиотехника. – 2001. – Т. 46, № 8. – С. 1020–1024.
31. Carter, R.J. Intentional electromagnetic interference test of a facility security entry system / R.J. Carter, M.G. Grothaus, J.H. Lucas // <http://^iszf.irk.ru/hawk/URSI2002/URSI-GA/papers/pl426.pdf>.
32. Månsson, D. Susceptibility of Civilian GPS Receivers to Electromagnetic Radiation / D. Månsson, R. Thottappillil, T. Nilsson, O. Lundén, M. Bäckström // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2008. – Vol. 50, no.2. – P. 434–437.
33. Сахаров, К.Ю. Исследование функционирования локальных вычислительных сетей в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, О.В. Михеев, В.А. Туркин, А.Н. Корнев, С.Н. Долбня, А.В. Певнев // Технологии ЭМС. – 2006. – № 3. – С. 36–46.
34. Идиатуллов, З.Р. Анализ и прогнозирование воздействия СВЧ-помех на низкочастотные радиоэлектронные устройства: дис. ... канд. тех. наук: 05.12.21 / Идиатуллов Заур Рафикович. – Казань, 1996. – 142 с.
35. Угрюмова, Н.В. Исследование влияния СВЧ излучения высокого уровня мощности на структуры с р-п переходами: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Угрюмова Надежда Викторовна. – Саратов, 1998. – 113 с.

36. Ключник, А. В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучения / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. –2013. – № 1. С. – 1–24.
37. Camp, M. Influence of the technology on the destruction effects of semiconductors by impact of EMP and UWB pulses / M. Camp, H. Garbe, D. Nitsch // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Minneapolis, USA. 19–23 August, 2002. – Vol. 1. – P. 87–92.
38. Kichouliya, R. Interaction of high power electromagnetic pulses with power cables and electronic systems / R. Kichouliya, M.J. Thomas // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – Ottawa, Canada. 25–29 July, 2016. – P. 159–163.
39. Nitsch, D. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats / D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J. L. ter Haseborg, H. Garbe // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. –Vol. 46, no. 3. P. 380–389.
40. Garbe, H. Susceptibility of different semiconductor technologies to EMP and UWB / H. Garbe, M. Camp // XXVII<sup>th</sup> General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI). – 2002. –P. 17–24.
- 41 Spadacini, G. Worst case and statistics of waveforms involved in wideband intentional electromagnetic attacks / G. Spadacini, T. Liang, F. Grassi, S. A. Pignari // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2018. – Vol. 60, no. 5. – P. 1436–1444.
42. Wunsch, D.C. Determination of threshold failure levels of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltages / D.C. Wunsch, R.R. Bell // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1968. – Vol. 15, no. 6. – P. 244–259.
43. Kichouliya, R. Interaction of high power electromagnetic pulses with power cables and electronic systems / R. Kichouliya, M.J. Thomas // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – Ottawa, Canada. 25–29 July, 2016. – P. 159–163.
44. Mojert, C. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks / C. Mojert, D. Nitsch, H. Friedhoff, J. Maack, F. Sabath, M. Camp, H. Garbe // 14<sup>th</sup>

- International Zürich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, Switzerland.– 2001. – P. 20–22.
45. Скворцов, В. Защита электронных устройств от импульсных помех большой энергии / В. Скворцов, В. Суворов // Силовая электроника. –2013. – Т. 2, № 41. – С. 16–20.
  46. Гизатуллин, З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2012. – 254 с.
  47. Рентюк, В. Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти //Компоненты и технологии. – 2017. – №. 7. – С. 124–125.
  48. Капура, И.А. Анализ методов и средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений / И.А. Капура, Б.В. Бакуменко // Системи обробки інформації. – 2010. – № 6. – С. 87–90.
  49. Верхулевский, К. Защитные TVS-устройства компании Semtech: разнообразие выбора // Компоненты и технологии. – 2017. – № 3. – С. 25–30.
  50. Han, S.M. A validation of conventional protection devices in protecting EMP / S.M. Han, C.S. Huh, J.S. Choi // Progress in Electromagnetic Research. – 2011. – Vol. 119. – P. 253–263.
  51. Патент на изобретение SU 1840225 A1. Устройство для защиты радиотехнической аппаратуры от импульсных перенапряжений / В.И. Грищук, В.В. Черноусов – Оpubл. 20.08.2006, Бюл. №23.
  52. Патент на изобретение SU 1840153 A1. Устройство для защиты средств связи от импульсных перенапряжений / В.И. Грищук, В.В. Черноусов, С.Н Грибанов – Оpubл. 20.07.2006, Бюл. №20.
  53. Патент на полезную модель № 98103128. Устройство защиты приемного тракта РЛС от мощного электромагнитного излучения / И.Н. Карельский, А.А. Нестеров – Оpubл. 01.27.1999.

54. Патент на изобретение H02H3/20, № 2046485. Устройство защиты потребителей от превышения напряжения в сети питания / А.П. Борисов, В.А. Гурлев, Г.К. Карпов, В.Н. Павлов – Оpubл. 20.10.1995.
55. Патент на полезную модель № 96106554. Устройство защиты входа радиоприемника от электромагнитного импульса ядерного взрыва / Д.А. Веселов, В.Е. Пониматкин, В.А. Сычугов, А.А. Вихлянцев, П.А. Шакиров – Оpubл. 27.07.1998.
56. Патент на полезную модель № 2001126011. Устройство защиты электроприемников от воздействия разрядов молнии и электромагнитных импульсов, наводимых разрядов в магистральных кабельных линиях электропередачи / С.В. Ханевич, Ю.Н. Скачков, А.Е. Северин, В.С. Ханевич – Оpubл. 10.07.2003.
57. Патент на изобретение H01R 13/66. Электрическая розетка с защитой от помех / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин – Оpubл. 10.04.2012.
58. Narayanasamy, V. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters / V. Narayanasamy, F. Luo // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2019. – Vol. 61, no. 6. – P. 2040–2049.
59. Гуревич, В.И. Применение LC-фильтров для защиты оборудования от электромагнитного импульса: реальная необходимость или инерция мышления? //Компоненты и технологии. – 2017. – №. 7. – С. 134–137.
60. Gupta, K.C. Microstrip lines and slotlines // K.C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, P. Bhartia. 2nd ed. Norwood (MA): Artech House; 1996.
61. Matthaei, G. Microwave filters, impedance-matching networks and coupling structures //Artech House Book. – 1980. – С. 775–809.
62. Бахарев С.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ и др. // под ред. В.И. Вольмана – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
63. Малютин, Н.Д., Регулярные и нерегулярные многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе: расчет первичных параметров,

- импульсные измерения характеристик: монография / Н.Д. Малютин, А.Н. Сычев, Э.В. Семенов, А.Г. Лошилов // – Томск: Томский гос. ун-т. систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 217 с.
64. Двухсторонняя печатная плата [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mokotechnology.com/ru/double-sided-pcb/> (дата обращения 04.12.2019).
65. Krzikalla, R. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses / R. Krzikalla, T. Weber, J.L. Ter Haseborg // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Istanbul, Turkey. 11–16 May, 2003. – Vol. 2. – P. 1313–1316.
66. Николаев, М. Компактные микрополосковые фильтры с повышенной селективностью // Современная электроника. – 2008. – № 1. – С. 28–30.
67. Песков, С.Н. Микрополосковые фильтры с укороченной связью // Научно-технические разработки. Теле-спутник. – 2010. – С. 78–81.
68. Packiaraj, D. Analysis of multi-conductor coupled microstrip lines with an aperture in the ground plane for the design of a broadband filter / D.Packiaraj, K.J. Vinoy, M. Ramesh, A.T.Kalghatgi // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2013. – Vol. 27, no. 7. – P. 856–867.
69. Radonić, V. Super-compact stopband filter based on grounded patch resonator / V. Radonić, V. Crnojević-Bengin // Electronics Letters. – 2010. – Vol. 46, no. 2. – P. 146–147.
70. Авгари, Ф.С. Микрополосковый эллиптический фильтр с реализацией на резонаторах одинаковой электрической длины / Ф.С.А. Авгари, А.Р. Кубалова, А.П. Максимов // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 5–15.
71. Захаров, А.В. Планарные трехрезонаторные полосно-пропускающие фильтры с перекрестной связью / А.В. Захаров, М.Е. Ильченко, И.В Трубаров // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62. – № 2. – С. 187–195.

72. Заболоцкий, А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.
73. Газизов, Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС. – 2006. – №4 (19). – С. 40–44.
74. Газизов, Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияние преднамеренных силовых электромагнитных воздействий: дис. ... док. тех наук: 05.12.04 / Газизов Тальгат Рашитович. – Томск, 2010. – 309 с.
75. Жечев, Е.С. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162–179.
76. Хажибеков, Р.Р. Многокаскадные модальные фильтры / дис. ... канд. тех. наук: 05.12.04 / Хажибеков Роман Русланович. – Томск, 2019. – 202 с.
77. Gazizov, A.T. New printed structures for protection against UWB pulses / Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizova O.A. // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Russia. 29 June–3 July, 2015. – P. 120–122.
78. Gazizov, A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, no 4. – P. 1136–1142.
79. Самотин, И.Е. Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Самотин Иван Евгеньевич. – Томск, 2011. – 289 с.
80. Zabolotsky, A. M. Experimental results on UWB pulse propagation in low-voltage power cables with different cross sections / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE

- Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 54, no 1. – P. 229–231.
81. Belousov, A.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect / Belousov A.O., Vlasova N.O. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 012020. – P. 1–5.
82. Заболоцкий, А.М. Вычисление собственных значений и векторов для исследования модального разложения импульса в гибком печатном кабеле бортовой аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, А.Т. Газизов // Материалы VI общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». – Санкт-Петербург, 19–21 марта 2014 г. – С. 244–245.
83. Surovtsev, R.S. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, no 6. – P. 1864–1871.
84. Шарафутдинов, В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144.
85. Zhechev, Y.S. Using  $N$ -norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / Zhechev Y.S., Zhecheva A.V., Kvasnikov A.A., Zabolotsky A.M. // Symmetry. – 2021. – Vol. 13(12), no. 2390. – P. 1–17.
86. Gazizov, A.T. Time-domain response of asymmetrical modal filter without resistors to ultrashort pulse excitation // A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 17<sup>th</sup> International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Erlagol, Russia. 30 June–4 July, 2016. – P. 85–88.
87. Kim, G.Y. Ultrashort pulse decomposition in hybrid protection devices based on the cascade-connected modal filter and meander line with broad-side / G.Y. Kim, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // 22nd IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai Region, Russia. 30 June 2021–4 July, 2021. – P. 1–4.

88. Chernikova, E.B. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander lines of three cascaded half-turns / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series. – 2019. – Vol. 1353, no. 012022. – P. 1–6.
89. Черникова, Е.Б. Зеркально-симметричные модальные фильтры и меандровые линии: дис. ... канд. тех наук: 05.12.04 / Черникова Евгения Борисовна. – Томск, 2021. – 241 с.
90. Смирнова, Д.С. Результаты апробации модальных фильтров для защиты от электромагнитных воздействий технического комплекса МЧС России / Д.С. Смирнова, О.С. Каймонов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – Т. 1. – №. 2. – С. 257–260.
91. Каймонов, О.С. Тестовая эксплуатация модальных фильтров в территориальных органах МЧС России / О.С. Каймонов, А.А. Макаренко // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 34–36.
92. Garg, R. Analytical and computational methods in electromagnetic // Norood: Artech House. – 2008. – P. 528.
93. Куксенко, С.П. Методы оптимального проектирования линейных антенн и полосковых структур с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... док. тех наук: 05.12.07 / Куксенко Сергей Петрович. – Томск, 2019. – 436 с.
94. Куксенко, С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.
95. Kuksenko, S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – No. 012110. – P. 1–7.

96. Gazizov, A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 4. – P. 1136–1142.
97. Многократное решение систем линейных алгебраических уравнений итерационными методами с предобуславливанием в задач электромагнитной совместимости: моногр. / Р.Р. Ахундов и др. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 152 с.
98. Gazizov, R.R. Detection and localization of interference and useful signal extreme points in closely coupled multiconductor transmission line networks / R.R. Gazizov, T.T. Gazizov, T.R. Gaizov // Symmetry. – 2019. – Vol. 11, no. 10. – P. 1–33.
99. Заболоцкий, А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи: монография / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Томск: Изд-во Нац. исслед. Томский гос. ун-т. – 2007. – 152 с.
100. Gazizov, T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Y. Sagiyeva, S.P. Kuksenko // Complexity. – 2019. – Vol. 2019, no. 6301326. – P. 1–11.
101. Venkataraman, J. Analysis of arbitrarily oriented microstrip transmission lines in arbitrarily shaped dielectric media over a finite ground plane / J. Venkataraman, S.M. Rao, A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, Y. Naiheng // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1985. – Vol. 33, no. 10. – P. 952–960.
102. Delbare, W. Space-domain green's function approach to the capacitance calculation of multiconductor lines in multilayered dielectrics with improved surface charge modeling / W. Delbare, D. De Zutter // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1989. – Vol. 37, no. 10. – P. 1562–1568.
103. Orlov, P. Short pulse propagation along microstrip meander delay lines with design constraints: comparative analysis of the quasi-static and electromagnetic approaches / P. Orlov, T. Gazizov, A. Zabolotsky // The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES). – 2016. – P. 238–243.

104. Chernikova, E.B. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // *Symmetry*. – 2019. – Vol. 11, no. 7. – P. 1–25.
105. 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». – Томск, 2016. – С. 325–327.
106. 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.
107. 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.
108. Самойличенко, М.А. Разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов // *Материалы двенадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления»*, Томск, 16–18 ноября 2016: В-Спектр, 2016. – Т. 1. – С. 222–224.
109. 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 Международной научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа*. – Томск, Россия 10–12 мая, 2017. – Ч. 3. С. 80–82.
110. 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.
111. 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 международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019». – Томск, Россия, 22–24 мая, 2019. – Ч. 1. – С. 273–275.
112. Самойличенко, М.А. Асимметрия как ресурс совершенствования модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, В.В. Самойличенко // 25-я Всероссийск. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2019». –Томск, Россия, 19 ноября, 2019. – С. 168–174.
113. 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.
114. 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 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020. – P. 159–164.
115. 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, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, no. 7, – P. 1–38.
116. 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 117–119.
117. 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 / М.А. Самойличенко, А.М. Zabolotsky // Journal of physics: conference series. – 2020. – Vol. 1611, no 1. – P. 1–4.
118. Патент на изобретение №2728327 РФ. Модифицированная микрополосковая линия с улучшенной защитой от сверхкоротких импульсов. – Самойличенко М., Газизов Т.Р. – №2019140943; Заяв. 09.12.2019; Оpubл. 29.07.2020, Бюл. №22.
119. Патент на изобретение №2732805 РФ. Модифицированная микрополосковая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов. – Самойличенко М., Газизов Т.Р. – №2019138503; Заяв. 27.11.2019; Оpubл. 22.09.2020, Бюл. №27.
120. 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. – №12. – С. 1–19.
121. Самойличенко, М.А. Уменьшение массы модального фильтра на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Материалы XV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 18–20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 275–278.
122. Samoylichenko, M.A. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board / М.А. Samoylichenko, Т.Р. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 1. – P. 1–7.
123. 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.
124. 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.
125. Самойличенко, М.А. Влияние экрана на разложение сверхкороткого импульса в модальных фильтрах на двухсторонней печатной плате // 27-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-27-2021». – Томск, Россия, 16 ноября, 2021. – С. 152–157.
126. Самойличенко, М.А. Экранированный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате // Материалы XVII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 19 – 21 ноября, 2021. – С. 56–58.
127. 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. (Принята к публикации)
128. 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 // 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. 196–199.
129. 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, no. 1. – P. 7–15.
130. 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.
131. 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 // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – №4. – С. 134–139.
132. 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.
133. Патент на изобретение №2603843 РФ. Способ резервирования для печатных плат. – Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – №2015137547/07; Заявл. 02.09.15; Опубл. 10.12.16. Бюл. №34.
134. Самойличенко, М.А. Моделирование модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости при разной толщине подложки // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018. – С. 302–304.
135. 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.
136. 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 // Proc. of IEEE 2019 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, 23–24 October, 2019. – P. 0237–0240.

137. 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.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**(справочное).**  
**КОПИИ ДОКУМЕНТОВ**



Акционерное общество  
**«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»**  
имени академика М.Ф. Решетнева»



ул. Ленина, д. 52, г. Железнодорожск, ЗАТО Железнодорожск, Краснодарский край, Российская Федерация, 662972  
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru  
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель генерального конструктора  
по электрическому проектированию и  
системам управления КА акционерного  
общества «Информационные  
спутниковые системы» имени академика  
М.Ф. Решетнева (АО «ИСС»),  
председатель секции №2 НТС, к.т.н.  
доцент



С.Г. Кочура

2022 г.

**АКТ**

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы  
Самойличенко Марии Александровны

**Комиссия в составе:**

- главного конструктора - начальника отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС», к.т.н. В.Н. Школьного;
- начальника отдела АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова;
- начальника сектора АО «ИСС» М.М. Иванова

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС» результатов диссертационной работы М.А. Самойличенко по квазистатическому моделированию модального фильтра с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости.

Эти результаты отражены в отчете за этап 2 о прикладных научных исследованиях по проекту «Теоретические и экспериментальные

исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов», выполненному в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0172.

Указанные результаты позволили сделать выбор устройства помехозащиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры, реализованного в виде макета по окончанию проекта, и подготовить новый проект «Разработка математических моделей, технологий, методик и аппаратно-программных средств для обеспечения электромагнитной совместимости цепей электропитания перспективных космических аппаратов», включенный в Комплексный план исследований КНТП «Глобальные информационные спутниковые системы».

Главный конструктор - начальник  
отделения проектирования и испытаний  
РЭА АО «ИСС», к.т.н.



В.Н. Школьный

Начальник отдела АО «ИСС», к.т.н.



С.Б. Сунцов

Начальник сектора АО «ИСС»



М.М. Иванов



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

к.т.н., доцент

Сенченко П.В.

11.03.2022 г.

**АКТ**

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы

Самойличенко Марии Александровны

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по научной работе, д.т.н. Куксенко С.П. и заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе, Бусыгина А.В., настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ следующих результатов диссертационной работы Самойличенко М.А.:

1. Результаты моделирования модального фильтра на двухсторонней печатной плате использованы для проведения курсовых проектов по дисциплине «Электромагнитная совместимость и управление радиочастотным спектром» в 2019–2020 учебном году бакалавриата по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

2. Результаты моделирования модального фильтра с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости использованы для проведения практических занятий по дисциплине «Учебная практика: ознакомительная практика» в 2021–2022 учебном году профиля «Видеоинформационные технологии» бакалавриата по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Заместитель заведующего каф. ТУ по научной работе  С.П. Куксенко

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе  А.В. Бусыгина

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2728327

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ  
С УЛУЧШЕННОЙ ЗАЩИТОЙ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ  
ИМПУЛЬСОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Самойличенко Мария (RU),  
Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2019140943

Приоритет изобретения 09 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 декабря 2039 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2732805

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ  
ЛИНИЯ, ЗАЩИЩАЮЩАЯ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ  
ИМПУЛЬСОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Самойличенко Мария (RU),  
Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2019138503

Приоритет изобретения 27 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 сентября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 ноября 2039 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Излиев*

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2762336

**СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ДВУХСТОРОННЕЙ  
ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С МОДАЛЬНЫМ  
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU)*

Авторы: *Самойличенко Мария (KZ), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2021105511

Приоритет изобретения **04 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **20 декабря 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **04 марта 2041 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Иевлев*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022610947

**Анализ модального фильтра на двухсторонней печатной  
плате со смещенными активным и пассивным  
проводниками**

Привлечатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Томский государственный университет систем  
управления и радиозлектроники» (RU)*

Автор(ы): *Самойличенко Мария Александровна (RU)*

Заявка № 2021682066

Дата поступления 29 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 января 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Израил*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022610946

**Анализ экранированного модального фильтра на  
двухсторонней печатной плате**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Томский государственный университет систем  
управления и радиозлектроники» (РУ)*

Автор(ы): *Самойличенко Мария Александровна (РУ)*

Заявка № 2021682112

Дата поступления 29 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 января 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*И. Ш. Израэль*

# СВИДЕТЕЛЬСТВО

## САМОЙЛИЧЕНКО

### Мария

Аспирантка кафедры телевидения и управления,  
за высокие достижения в научно-исследовательской деятельности  
включена в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа

Ректор

В.М. Рулевский

Проректор по НРИИ

А.Г. Лощиллов



23 декабря 2020 г.

**TUSUR** | TUSUR  
UNIVERSITY  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники



Международная  
научно-практическая  
конференция  
«ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА  
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»

# Диплом II степени

награждается

*Самойличенко М. А.*

за лучший доклад на  
Международной научно-практической  
конференции «Электронные средства  
и системы управления»

секция 13 «Электромагнитная совместимость»

**Председатель конференции**

Ректор ТУСУРа

28 – 30 ноября 2018 г.

г. Томск



*А. А. Шелустанов*