На правах рукописи

Белоусов Антон Олегович

Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов

Специальность 05.12.04 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

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

Научный руководитель – **Газизов Тальгат Рашитович**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты – **Уваисов Сайгид Уваисович**
доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет

Муравьев Сергей Васильевич
доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

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

Защита состоится 29 сентября 2020 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа https://postgraduate.tusur.ru/urls/mzpbuu3q

Автореферат разослан ___ _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) важно для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), особенно для критичной. Показательным примером является бортовая РЭА. Так, с каждым годом неуклонно растет плотность монтажа печатных плат (ПП) бортовой РЭА космических аппаратов. Этот рост и увеличение верхней граничной частоты спектра используемых сигналов заставляют разработчика уделять особое внимание ЭМС бортовой РЭА. Неучёт требований ЭМС может привести к утрате космического аппарата, что влечёт за собой большие финансовые потери и подрыв репутации предприятия-разработчика.

В последние десятилетия становится актуальной проблема преднамеренных силовых электромагнитных воздействий (ПДЭМВ). Особое внимание уделяют мощным импульсам наносекундного и субнаносекундного диапазонов – сверхкоротким импульсам (СКИ), поскольку из-за широкого спектра и малой длительности они способны проникать в различную РЭА, а существующие сетевые фильтры не защищают от них. Поэтому совершенствуются устройства защиты, а также генераторы для испытаний.

Степень разработанности темы

Необходимость совершенствования моделирования и обеспечения ЭМС подтверждается активными исследованиями, которыми руководят Л.Н. Кечиев, С.А. Сухоруков, В.Е. Фортов, J.L. ter Haseborg, W. Radasky. Вопросы ЭМС печатных узлов и стойкости полупроводниковых компонентов к воздействию электростатических разрядов, разработки схем и методов защиты от электромагнитных воздействий, функциональной безопасности бортовых систем отражены в работах Б.Б. Акбашева, Н.В. Балюка, З.М. Гизатуллина, В.Ю. Кирилова, С.Ф. Чермошенцева. Исследования по созданию генераторов импульсов и оценке устойчивости РЭА к воздействию электромагнитных полей, а также разработке методов и средств оценки влияния электромагнитных импульсов, отражены в работах А.М. Белянцева, В.П. Беличенко, В.И. Кошелева, Л.О. Мыровой, Ю.В. Парфенова. Ряд исследований, подтверждающих, что с помощью средств генерации СКИ можно воздействовать на обмен данными по телекоммуникационным сетям различного назначения, провели Р.В. Киричек, С.И. Комягин, Ю. Сахаров.

Наиболее популярным в научном сообществе сегодня является решение задачи направленного синтеза на основе разных подходов, среди которых есть стохастические и детерминированные методы оптимизации. В такой задаче требуется найти оптимальный набор или размещение элементов из заданного множества, для чего активно применяются эволюционные алгоритмы. Большой вклад в исследование их применения в прикладных задачах внесли Z. Altman, E. Altshuler, C.G. Christodoulou, K. Christos, R. Mittra, Y. Rahmat-Samii, K. Sotirios, Л. Гладков, А. Еремеев, В. Курейчик, Т. Панченко и др.

Известен ряд устройств для защиты от СКИ, но они имеют большие габариты и высокую стоимость, тогда как традиционные приборы

помехозащиты обладают рядом недостатков: малая мощность; недостаточное быстродействие; паразитные параметры. Многопроводные помехозащитные фильтры исследовали M. Camp, H. Garbe, R. Krzikalla, F. Sabath и T. Weber, а многосвязные полосковые структуры – Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов и А.Н. Сычев. Многопроводные полосковые фильтры успешно разрабатывают Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев и др. Существует принцип защиты, основанный на модальной фильтрации – использовании модальных искажений (изменений сигнала за счет разности задержек мод многопроводной линии передачи (МПЛП)) для защиты за счет последовательного модального разложения импульса в отрезках МПЛП. Значительный вклад в исследования устройств защиты на основе модальной фильтрации внесли Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и И.Е. Самотин. Ряд их работ свидетельствует о возможности создания устройств защиты на основе модальной фильтрации – модальных фильтров (МФ). Они могут отличаться радиационной стойкостью, малой массой и дешевизной. В качестве устройства защиты от импульсных помех можно использовать полосковые структуры на широко распространенном фольгированном стеклотекстолите. Однако раньше исследовались МФ лишь на связанных линиях, тогда как МФ на многопроводных линиях почти не исследованы, а между тем актуально использование этого ресурса.

Целесообразными в этом направлении видятся исследования по ослаблению СКИ, а также увеличению длительности ослабляемого СКИ. Кроме того, может быть важным согласование МФ с трактом (например, для минимизации отражений полезных высокочастотных сигналов от входа МФ), а также уменьшение массы и габаритов МФ (например, для космических и морских применений). Поэтому актуально исследовать возможности: уменьшения амплитуды импульсов разложения на выходе МФ; выравнивания временных интервалов между ними при количестве проводников (N) больше двух; максимизации разности максимальной и минимальной задержек импульсов для увеличения длительности СКИ, который будет разлагаться полностью; согласования тракта, а также уменьшения массы и габаритов МФ. Указанное представляется возможным выполнить с помощью параметрической оптимизации эвристическим поиском (ЭП) и генетического алгоритма (ГА). Кроме того, целесообразно расширить применение структур с модальным разложением (т.е. таких, в которых возможно модальное разложение сигналов) для обработки импульсных сигналов.

Цель работы – выявить возможности совершенствования структур с модальным разложением, используемых для расщепления воздействующего импульса на последовательность импульсов, за счет увеличения числа проводников, а также оптимизации по различным критериям посредством эвристического поиска и генетического алгоритма.

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

1. Выполнить обзор методов моделирования и оптимизации МФ.
2. Выполнить многовариантный анализ и оптимизацию многопроводных микрополосковых МФ посредством ЭП и ГА.

3. Разработать макеты МФ и выполнить натурный эксперимент.

4. Сформулировать основные критерии оптимизации и апробировать их с помощью оптимизации многопроводных полосковых МФ посредством ЭП.

5. Сформулировать многокритериальные целевые функции и апробировать их с помощью оптимизации многопроводных микрополосковых МФ посредством ГА.

6. Рассмотреть использование многопроводных структур с модальным разложением в задачах формирования цуга импульсов.

Научная новизна

1. Предложена защита радиотехнических устройств от сверхкоротких импульсов на основе использования многопроводных модальных фильтров: микрополосковых; зеркально-симметричных; с круговой симметрией.

2. Доказана возможность максимизации длительности полностью разлагаемого на последовательность импульсов в многопроводных полосковых модальных фильтрах сверхкороткого импульса, достигающаяся за счет максимизации разности задержек между первым и последним импульсами разложения и выравнивания – между соседними.

3. Введены целевые функции, компоненты которых зависят от амплитуды выходных импульсов, их разностей задержек, временных интервалов между ними, согласования с трактом, массы и объема, и доказана перспективность совместного использования этих компонент при многокритериальной оптимизации структур с модальным разложением.

Теоретическая значимость

1. Раскрыты особенности влияния параметров зеркально-симметричного и многопроводных микрополосковых модальных фильтров на погонные задержки мод и отклик на воздействие сверхкороткого импульса.

2. Проведена модернизация: целевых функций для оптимизации модальных фильтров; выражений для вычисления погонных задержек мод зеркально-симметричного модального фильтра.

3. Изложен сравнительный анализ четырехпроводного микрополоскового модального фильтра и зеркально-симметричного модального фильтра.

4. Изучены причинно-следственные связи между асимметрией матриц погонных параметров многопроводных линий передачи и формой напряжения в конце линии.

Практическая значимость

1. Разработаны и внедрены результаты: моделирования шины печатной платы радиоприемного устройства системы автономной навигации космического аппарата, выявления уровня перекрестных наводок и оценки коэффициента передачи в межсоединениях печатной платы, позволившие выявить критичные места трассировки; создания методологии для синтеза оптимальной сети высоковольтного электропитания перспективных космических аппаратов (*2 акта внедрения в АО «ИСС», г. Железногорск*);

моделирования, экспериментальных исследований и оптимизации многопроводных микрополосковых модальных фильтров для защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов, позволившие улучшить подготовку магистрантов двух университетов (*2 акта внедрения: НИ ТГУ и ТУСУР, г. Томск*).

2. Создана система практических рекомендаций по моделированию, оптимизации и использованию многопроводных модальных фильтров, позволяющая улучшить их характеристики.

3. Представлены предложения по дальнейшему совершенствованию: оптимизации за счет последовательного использования эвристического поиска и генетического алгоритма с уменьшенными вычислительными затратами; генерации высоковольтных импульсов за счет использования многопроводных структур с модальным разложением при формировании цуга колебаний без использования дорогостоящих компонентов.

4. Определена степень влияния потерь в проводниках и диэлектриках многопроводных модальных фильтров при использовании реальных оцифрованных сигналов с разными длительностями.

5. Определены пределы изменения характеристик многопроводных модальных фильтров после нанесения влагозащитного покрытия.

Методология и методы исследования. В работе применено математическое моделирование, основанное на методе моментов и модифицированном методе узловых потенциалов, квазистатический подход, модальный анализ, параметрическая оптимизация на основе ЭП и ГА, а также натурный эксперимент на базе скалярного анализатора цепей и комбинированного стробоскопического осциллографа.

Положения, выносимые на защиту

1. Добавление к связанной микрополосковой линии дополнительных нагруженных проводников, до 5, позволяет уменьшить амплитуду выходного напряжения при воздействии сверхкороткого импульса на крайний проводник: после параметрической оптимизации эвристическим поиском, при длине проводников 60 см с нагрузками 50 Ом и длительности импульса 36 пс (по уровню 0,5) амплитуда уменьшается на 33% при уменьшении полосы пропускания полезного сигнала от 0,53 до 0,47 ГГц.

2. В многопроводных полосковых модальных фильтрах возможна максимизация длительности полностью разлагаемого сверхкороткого импульса за счет выравнивания временных интервалов между импульсами разложения и максимизации разности задержек между первым и последним импульсами разложения.

3. При параметрической оптимизации микрополосковых модальных фильтров с воздействующим сверхкоротким импульсом длительностью 36 пс достижима меньшая амплитуда выходного напряжения:

трехпроводного, по амплитудному критерию, с последовательным использованием эвристического поиска и генетического алгоритма – на 13% меньше, чем эвристическим поиском;

трехпроводного, по амплитудному и трем временным критериям, генетическим алгоритмом – на 18% меньше, чем по амплитудному критерию;

трехпроводного, по амплитудному, трем временным и массогабаритному критериям, генетическим алгоритмом – на 47% меньше, чем по амплитудному и трем временным критериям;

четырехпроводного, по амплитудному, трем временным критериям и критерию согласования, генетическим алгоритмом – на 63% меньше, чем трехпроводного, по амплитудному и трем временным критериям.

Оригинальные результаты соотносятся с паспортом специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения по п. 9 – разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств.

Достоверность результатов

Достоверность подтверждена сравнением результатов моделирования с результатами других авторов, других программных продуктов и натурного эксперимента. Она основана на корректном использовании теории линий передачи, согласованности результатов квазистатического анализа, электродинамического анализа и измерений. Реализуемость предложенных устройств на практике подтверждена моделированием и экспериментально.

Использование результатов

1. ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», договор № 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

2. ОКР «Разработка цифрового управляющего и силовых модулей энергопреобразующего комплекса для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов», тема «Модули ЭПК-100», договор № 18/15 от 29.07.2015 г. в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

3. НИР «Комплексные исследования по разработке алгоритмов, математического обеспечения и средств проектирования для создания новых элементов защиты и контроля вычислительных систем на основе модальных явлений», грант РФФИ 14-29-09254, 2014–2016 гг.

4. НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РНФ 14-19-01232, 2014–2016 гг.

5. НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости

радиоэлектронной аппаратуры» в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, проект 8.1802.2014/K, 2014–2016 гг.

6. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности, проект 8.9562.2017, 2017–2019 гг.

7. 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 гг.

8. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РНФ 19-19-00424, 2019–2021 гг.

9. НИР «Структурно-параметрический синтез оптимальных полосковых структур для защиты технических средств от сверхкоротких импульсов», грант Президента Российской Федерации МД-2652.2019.9, 2019–2020 гг.

10. Учебный процесс НИ ТГУ: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Проектирование и конструирование промышленных космических систем» для предприятия «Газпром космические системы» в весеннем семестре 2017/2018 уч. г.

11. Учебный процесс магистрантов радиотехнического факультета ТУСУР.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах ФЦП ИР (проект RFMEFI57417X0172), РНФ (грант 19-19-00424), РФФИ (грант 19-37-90075), РФФИ (грант 20-37-70020), РФФИ (грант 19-37-51017); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2017 г.; на назначение стипендий Президента РФ в 2016 и 2017 гг. и Правительства РФ в 2019 и 2020 гг. студентам и аспирантам по приоритетным направлениям; повышенной стипендии студентам за достижения в НИРС в 2015 и 2016 гг. и повышенной государственной академической стипендии в 2017 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах конференций: всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», Томск, 2015, 2017, 2018 гг.; межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 2015, 2017, 2018 гг.; Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Эрлагол (Алтай), 2016, 2017, 2019 гг.; Int. Siberian conf. on control and communications, Москва, 2016, Астана, 2017, Томск, 2019; 2017 Sib. Symp. on Data Science and Eng., Новосибирск, 2017 г.; 2017 Int. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences, Новосибирск, 2017, 2019 гг.; XI Int. IEEE Scientific and Technical Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Омск, 2017 г.; 23-я межд. научно-практ. конф. «Природные и

интеллектуальные ресурсы Сибири», Томск, 2017, 2019 гг.; межд. научно-метод. конф. «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов», Томск, 2017 г.; научно-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО НПЦ «Полюс», Томск, 2018 г.; Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, Москва, 2018 г.

Публикации. Результаты исследований отражены в 56 публикациях (5 без соавторов): 4 статьи в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в журналах, входящих в Q1 WoS или Scopus; 7 статей в журналах, индексируемых в WoS и Scopus; 16 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 15 докладов в трудах других конференций; 12 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ. В автореферате приведены 33 основные публикации.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, 6 разделов, заключение, список литературы из 259 наименований, приложение из 30 с. (копии актов внедрения, свидетельств, грамот и дипломов). Объём с приложением – 247 с., в т.ч. 83 рисунка и 46 таблиц.

Личный вклад. Непосредственное участие автора в постановке цели и задач исследования. Результаты диссертационной работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии. Часть результатов по моделированию и оптимизации зеркально-симметричных МФ получена совместно с *Черниковой Е.Б.*, а их экспериментальное исследование – с *Жечевым Е.С.* Натурные экспериментальные исследования также выполнены совместно с *Заболоцким А.М.* Отдельные результаты исследования получены совместно с соавторами публикаций. Обработка и интерпретация результатов выполнены лично автором.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Подходы к моделированию и оптимизации многопроводных линий передачи для помехозащиты радиотехнических устройств: обзор

В подразделе 1.1 рассмотрены общие подходы к моделированию распространения сигналов. В подразделе 1.2 выполнен обзор исследований по вычислению отклика МПЛП. В подразделе 1.3 выполнен обзор методов помехозащиты РЭА и описаны результаты тестовой эксплуатации МФ в МЧС России. В подразделе 1.4 рассмотрены основные подходы к генерации мощных СВЧ импульсов. В подразделе 1.5 рассмотрены основные подходы к оптимизации, выполнен обзор исследований по использованию ГА, показавший его перспективность. В подразделе 1.6 сформулированы цель и задачи работы.

2. Предварительное моделирование многопроводных структур

В подразделе 2.1 показано уменьшение амплитуды СКИ на выходе микрополосковых линий (МПЛ) с увеличением количества проводников (N) от 1 до 5. Выполнена оптимизация, посредством ЭП и ГА, расстояния между проводниками (s_i) (от 10 до 1000 мкм) многопроводных МФ на основе МПЛ

для N=3–5, при воздействии сигнала в форме трапеции ($E(t)$) с ЭДС 5 В, фронтом (t_r), плоской вершиной (t_d) и спадом (t_f) по 50 пс. В таблице 2.1 приведены амплитуды напряжений ($\max(U(t))$) в конце активного проводника.

В подразделе 2.2 представлены результаты для МПЛП с круговой симметрией. Показано, что с ростом N от 2 до 8 ослабление СКИ возрастает от 2 до 4 раз, но при N=3 ухудшается до 1,5 раза из-за наложения двух импульсов с одинаковой задержкой. Выявлено уменьшение диагональных значений матрицы характеристических импедансов ($\mathbf{Z}_C$) с ростом N. В подразделе 2.3 представлены результаты оценки влияния асимметрии матриц погонных параметров МПЛП, вычисленных методом моментов, на форму напряжения в конце линии. На примере трех видов МПЛП показано, что это влияние несущественно.

Таблица 2.1 – Значения max(U), В при различных методах оптимизации

Способы подключения для N=3–5	ГА	ЭП
N=3, активный крайний проводник	0,8419	0,8423
N=3, активный центральный проводник	1,2080	1,2821
N=4, активный крайний проводник	0,6488	0,7059
N=4, активный центральный проводник	0,6930	0,7280
N=5, активный крайний проводник	0,5661	0,5667
N=5, активный центральный проводник	0,6688	0,6703

3. Разработка макетов многопроводных микрополосковых МФ

В подразделе 3.1 выполнены предварительный анализ и моделирование макетов МФ, отличающиеся учетом потерь в проводниках и диэлектриках, использованием реальных параметров МФ и реальных оцифрованных воздействий разной длительности. В подразделе 3.2 представлена разработка конструкции макетов на основе многопроводных МПЛ длиной (l) 60 и 100 см (рисунок 3.1) для тракта 50 Ом, а также натурный эксперимент и сравнение результатов моделирования и эксперимента.

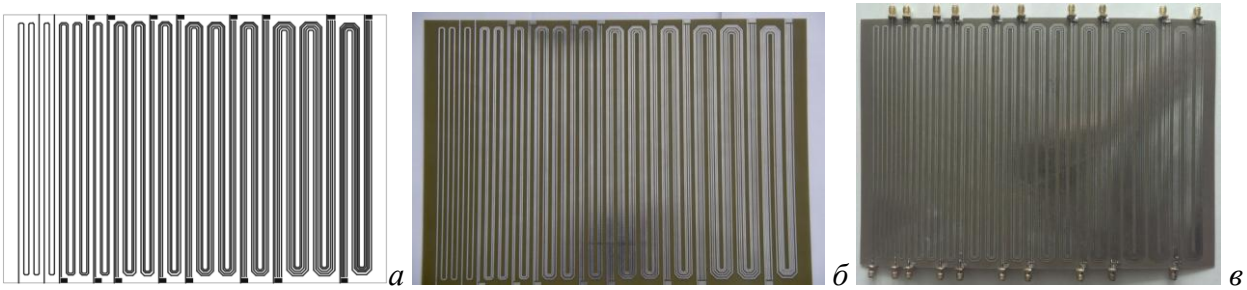

Рисунок 3.1 – ПП после трассировки (*а*), изготовления (*б*) и монтажа резисторов типа 0603 и SMA-соединителей (*в*)

Входным сигналом был импульс осциллографа С9-11 с амплитудой $E(t)$ 0,657 В и t_r=28 пс, t_f=24 пс, t_d=12 пс (по уровням 0,1–0,9), а общей длительностью (t_Σ) (по уровню 0,5) – 36 пс. Измерены реальные размеры: ширина и толщина проводников w=1000 мкм и t=18 мкм, толщина подложки h=500 мкм при l=60 см. Для подложки принято, что ε_r=4,5 и tgδ=0,025 на частоте f=1 МГц. Результаты вычислений и измерений $U(t)$ на выходе 1–5-проводных МПЛ и схема эксперимента приведены на рисунке 3.2*а–д*.

В подразделе 3.3 представлены частотные характеристики макетов МФ для N=2–5. Скалярным анализатором цепей Р2М-40 измерены частотные зависимости $|S_{21}|$ и сравнены с вычисленными. Оценено влияние потерь на $|S_{21}|$ при моделировании для частот от 10 МГц до 10 ГГц. В таблицу 3.1 сведены полосы пропускания по уровню минус 3 дБ. Они составили 0,53–0,47 ГГц при измерении и 0,55–0,52 ГГц при моделировании с учетом потерь, которые снизили затухание на частотах резонансов.

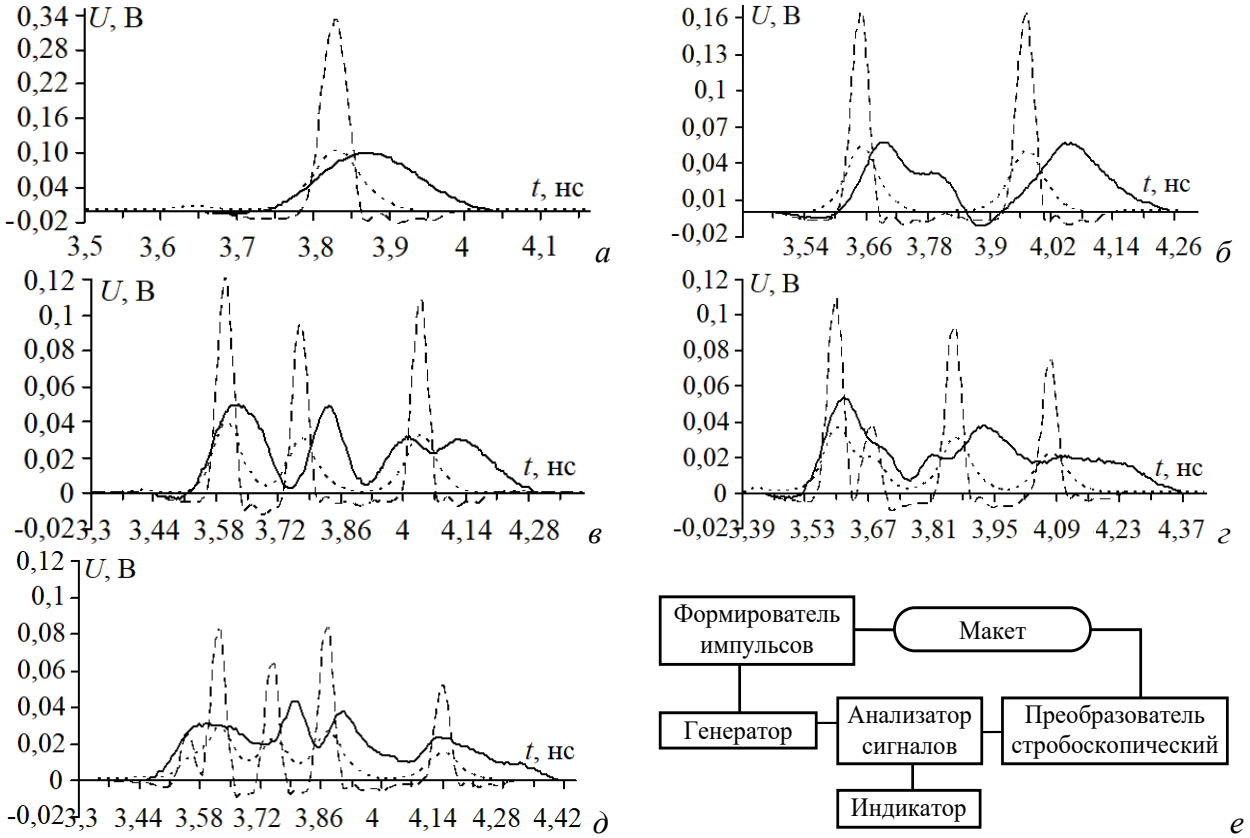

Рисунок 3.2 – $U(t)$ на выходе 1–5-проводных (*а–д*) МПЛ: моделирование без учета (– –) и с учетом (⋯) потерь; эксперимент (—). Схема эксперимента (*е*)

Таблица 3.1 – Полоса пропускания (ГГц) макетов МФ для N=2–5

N	Моделирование		Эксперимент (Э)	Отклонение, %
	Без потерь	С потерями (П)		(П–Э)/(П+Э)×100%
2	0,7	0,55	0,53	±1,85
3	0,61	0,52	0,48	±4
4	0,64	0,52	0,48	±4
5	0,65	0,53	0,47	±6

4. Оптимизация многопроводных полосковых МФ посредством ЭП

В подразделе 4.1 представлены ряд критериев оптимизации МФ и выражения для ускоренного вычисления целевой функции, а в подразделе 4.2 – максимизация длительности СКИ, полностью разлагаемого в многопроводных МФ, за счет выравнивания интервалов времени между импульсами разложения.

Моделировались 3-, 4-, 5-проводные МПЛ при t=105 мкм, h=190 мкм, ε_r=5, l=4 м. Значение w=290 мкм оптимизировано для $\mathbf{Z}_C$ одиночной линии 50 Ом и не менялось, как и значения t, h и ε_r. Значения s_i оптимизировались по критерию выравнивания разностей задержек между импульсами разложения.

Параметры после ЭП: s_1=170 мкм, s_2=540 мкм для N=3; s_1=70 мкм, s_2=335 мкм, s_3=250 мкм для N=4; s_1=15 мкм, s_2=32 мкм, s_3=290 мкм, s_4=200 мкм для N=5. При R=50 Ом вычислялся временной отклик в начале и конце МПЛ (рисунок 4.1) на воздействие импульса с амплитудой $E(t)$ 5 В и t_r=t_f=t_d=50 пс.

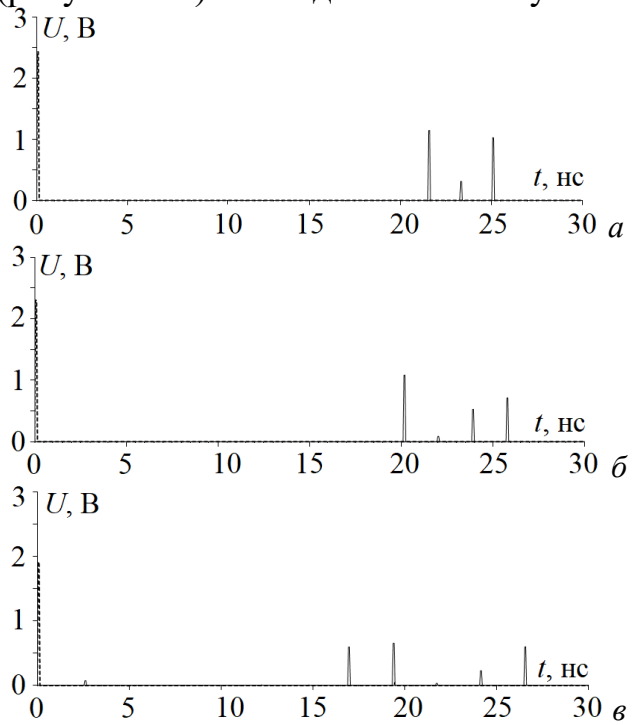

Рисунок 4.1 – $U(t)$ в начале (- -) и конце (—) МПЛ при N=3–5 (*а–в*)

В подразделе 4.3 представлена максимизация разности задержек между первым и последним импульсами разложения в многопроводных МФ. Значения всех параметров, кроме s_i, те же, что в подразделе 4.2. Значения s_i оптимизировались посредством ЭП для 3-, 4-, 5-проводной МПЛ. Взяты 2 значения нижней границы диапазона s_1 для 3-проводной МПЛ: 50 и 1 мкм. Первое взято как минимальное для технологии ПП. Второе взято для оценки предельных значений s_i. Для s_i≥50 мкм оптимизированные значения s_i оказались в нижней границе диапазона (s_1=50 мкм, s_2=50 мкм), а для s_i≥1 мкм – вблизи неё (s_1=1 мкм, s_2=10 мкм). При R=50 Ом вычислялся временной отклик на воздействие импульса с амплитудой $E(t)$ 5 В и t_r=t_f=t_d=50 пс (рисунок 4.2).

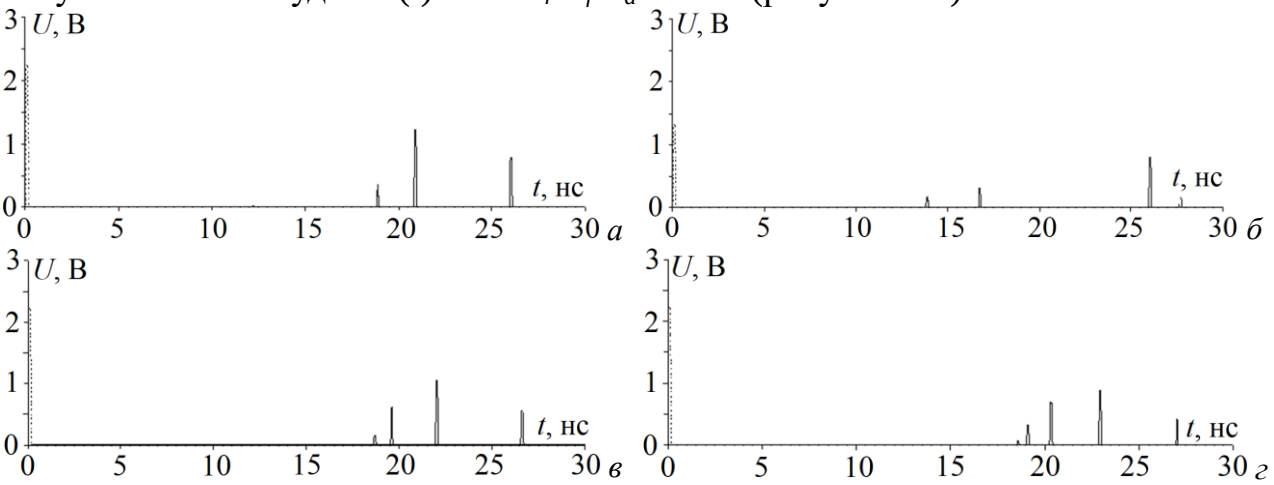

Рисунок 4.2 – $U(t)$ в начале (- -) и конце (—) МПЛ для 3- (s_1=s_2=50 мкм) (*а*), 3- (s_1=1 мкм и s_2=10 мкм (импульс 4 – отражение самой быстрой моды от конца проводника, приходящее в его начало)) (*б*), 4- (s_1=s_2=s_3=50 мкм) (*в*) и 5- (s_1=s_2=s_3=s_4=50 мкм) (*г*) проводных линий

В подразделе 4.4 показано влияние потерь в проводниках и диэлектриках на выходной сигнал. Выполнена оценка амплитуды напряжения на выходе линии при воздействии СКИ разной длительности. Показано влияние дисперсии на форму выходного сигнала. При учете потерь в диэлектриках выявлен преждевременный приход импульсного сигнала в конец МПЛ.

Влияние потерь в проводниках приводит к небольшой задержке $U(t)$ на выходе, относительно случая без потерь. Для N>1 наблюдается разное влияние потерь в проводниках и диэлектриках на отдельные моды. В подразделе 4.5 выполнено моделирование зеркально-симметричных МФ и их оптимизация посредством ЭП по различным критериям. После оптимизации по двум критериям 4-х структур зеркально-симметричного МФ достигнуто разложение СКИ длительностью до 150 пс с коэффициентом ослабления 4 раза. Вычислены значения погонных задержек (τ_i) с помощью аналитических выражений, которые могут использоваться не только для вычисления τ_i, но также, в составе более сложных выражений для вычисления временного отклика, что может существенно ускорить оптимизацию. В подразделе 4.6 представлены результаты натурных и вычислительных экспериментов для зеркально-симметричного МФ: разработан и изготовлен макет длиной l=1 м (рисунок 4.3), получены временные и частотные характеристики, а также выполнено сравнение результатов натурных и вычислительных экспериментов. В результате, импульс длительностью 257 пс разлагается на последовательность импульсов меньшей амплитуды с коэффициентом ослабления 3,77 раза (по результатам эксперимента) при контролируемой полосе пропускания полезного сигнала 250 МГц. Максимальное отклонение между результатами эксперимента и квазистатического моделирования составляет 11,92% и 2,91%, эксперимента и электродинамического моделирования – 8,57% и 8,25%, квазистатического и электродинамического моделирования – 3,38% и 5,3%, при анализе во временной и частотной областях соответственно.

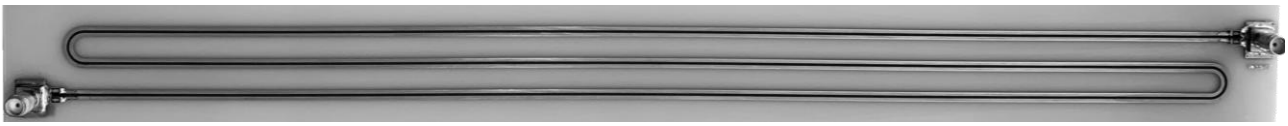

Рисунок 4.3 – Фото макета четырехслойного зеркально-симметричного МФ

В подразделе 4.7 представлен сравнительный анализ двух устройств защиты от мощных СКИ: 4-проводного микрополоскового МФ и зеркально-симметричного МФ. Представлено сравнение временных и частотных характеристик. Приведены результаты качественного сравнения представленных МФ по ряду признаков, позволяющие определить достоинства и недостатки каждого из устройств.

5. Оптимизация многопроводных микрополосковых МФ посредством ГА

В подразделе 5.1 выполнена последовательная оптимизация 3-проводного микрополоскового МФ посредством ЭП и ГА. Воздействие – оцифрованный сигнал осциллографа С9-11, с амплитудой $E(t)$ 0,657 В и t_r=28 пс, t_f=24 пс, t_d=12 пс (по уровням 0,1–0,9), а t_Σ (по уровню 0,5) – 36 пс. МФ оптимизировался при: w=1000 мкм, t=18 мкм, h=500 мкм, ε_r=4,5, l=60 см в тракте 50 Ом. Значение w ранее оптимизировалось для обеспечения волнового сопротивления одиночной линии 50 Ом и не менялось, как и значения t, h и ε_r. Значения s_i оптимизировались по критерию минимизации амплитуды импульсов на выходе МФ. После ЭП получено s_1=200 мкм и s_2=685 мкм. Параметры ГА: число особей – 3, 10; число поколений – 10, 30, 100;

коэффициент мутации 0,1; коэффициент кроссовера 0,5; число бит для кодирования каждого параметра – 16. Оптимизация s_1 и s_2 выполнялась в диапазоне ±200 мкм от значений, полученных при ЭП. После ГА получено s_1=330 мкм и s_2=675 мкм. Зависимости $U(t)$ показаны на рисунке 5.1.

В подразделе 5.2 представлены формулировка многокритериальной целевой функции из амплитудных и временных критериев, а также результаты многокритериальной оптимизации многопроводных МФ посредством ГА.

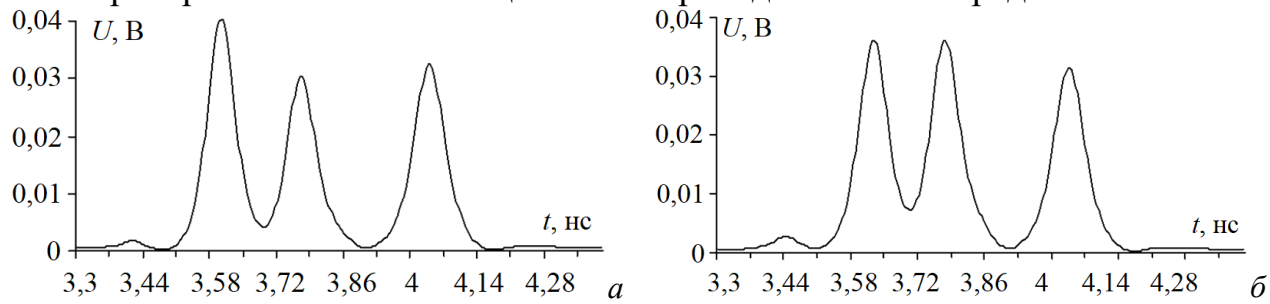

Рисунок 5.1 – $U(t)$ на выходе 3-проводного МФ после ЭП (*а*) и ГА (*б*)

Параметры ГА: число особей – 50; количество поколений – 100; коэффициент мутации 0,1; коэффициент кроссовера 0,5, число бит для кодирования каждого параметра – 16. Использовалась сформулированная целевая функция, объединяющая в себе 1 амплитудный и 3 временных критерия для N=3 (при M_i=1, i=1…4):

$$F = M_1 \frac{\max\left(U(t)\right)}{\max\left(E(t)\right)} + M_2 \frac{\tau_1 - \frac{1}{c}}{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}} - 1}{c}} + M_3 \frac{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}}}{c} - \tau_3}{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}} - 1}{c}} + M_4 \frac{\left|2\tau_2 - \tau_1 - \tau_3\right|}{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}} - 1}{c}}, \qquad (5.1)$$

где $M_1, \ldots, M_4$ – весовые коэффициенты; τ_1, τ_2, τ_3 – погонные задержки мод; $\varepsilon_{r\max}$ – максимальное значение ε_r диэлектриков поперечного сечения; c – скорость света. Воздействие – как в разделе 5.1. Зависимости $U(t)$ представлены на рисунке 5.2*а*.

3-проводный МФ оптимизировался при w=1000 мкм, ε_r=5, l=60 см, R=50 Ом. Значение w в процессе оптимизации не менялось, как и значение ε_r. Значения t, h и s_1 и s_2 оптимизировались по многокритериальной целевой функции (5.1) в диапазонах t (10–200 мкм), h (200–2000 мкм), s_1 и s_2 (1–1000 мкм). После оптимизации с помощью ГА получено t=174 мкм, h=995 мкм, s_1=10 мкм и s_2=115 мкм. Амплитуда выходного напряжения – 0,0306662 В, погонные задержки мод – 3,96396, 5,20713, 6,45085 нс/м, а разницы соседних – 1,24317 и 1,24372 нс/м, совпадающие с точностью до 1 пс/м.

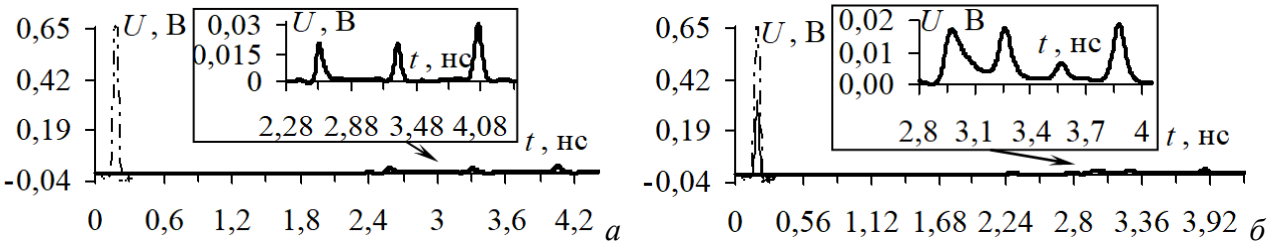

Рисунок 5.2 – $E(t)$ (–·–),$U(t)$ на входе (—) и выходе (—) 3-проводного микрополоскового МФ с параметрами после 4-критериальной оптимизации (*а*) и 4-проводного микрополоскового МФ с параметрами после 5-критериальной оптимизации (*б*) с помощью ГА

Оптимизировались параметры 4-проводного МФ с использованием целевой функции с амплитудным и временными критериями для тракта 50 Ом. При тех же параметрах ГА использовалась сформулированная целевая функция, объединяющая 1 амплитудный, 3 временных, а также критерий согласования (при M_i=1, i=1…5):

$$F=\frac{\max(U(t))}{\max(E(t))}+\frac{\tau_1-\frac{1}{c}}{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}}-1}{c}}+\frac{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}}}{c}-\tau_4}{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}}-1}{c}}+$$
$$+\frac{\max\left(\left|\tau_2-\frac{\tau_4+2\tau_1}{3}\right|,\left|\tau_3-\frac{\tau_1+2\tau_4}{3}\right|\right)}{\frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}}-1}{c}}+\frac{\left|\max\left(E(t)\right)-2\max\left(U_{IN}(t)\right)\right|}{\max\left|E(t)\right|}. \quad (5.2)$$

МФ оптимизировался при следующих параметрах: w=180 мкм, ε_r=5, l=60 см, R=50 Ом. Значение w в процессе оптимизации не менялось, как и значение ε_r. Значения t, h и s_1, s_2 и s_3 оптимизировались по 5-критериальной целевой функции (5.2) в диапазонах t (10–200 мкм), h (200–2000 мкм), s_1, s_2 и s_3 (1–1000 мкм). Получены значения t=35 мкм, h=501 мкм, s_1=8 мкм, s_2=23 мкм и s_3=390 мкм. Амплитуда напряжения на выходе линии составила 0,0188094 В. Погонные задержки мод равны 4,57947, 5,10955, 5,63149 и 6,15283 нс/м, а разницы соседних – 0,53008, 0,52194 и 0,52134 нс/м, т.е. совпадают с точностью до 0,01 нс/м, отличаясь на 2%. Амплитуда на входе МФ составила 0,323928 В, что в 2,03 раза меньше амплитуды $E(t)$ (0,657 В) и обеспечивает согласование. Зависимости $U(t)$ представлены на рисунке 5.2*б*.

Сформулирован массогабаритный критерий, для проверки которого оптимизирован 3-проводный МФ по амплитудному и трем временным критериям, критерию согласования и массогабаритному критерию при тех же начальных параметрах структуры и ГА. Получены его масса (0,028 кг) и объем ($1{,}292\cdot10^{-5}$ м^3) после его оптимизации без учета массогабаритного критерия, а также масса (0,011 кг, что в 2,5 раза меньше) и объем ($4{,}409\cdot10^{-6}$ м^3, что в 3 раза меньше) после оптимизации с его учетом. Кроме того, улучшились не только массогабаритные характеристики, но и амплитудные с временными.

Методическая значимость результатов данного раздела: весьма общая 5-критериальная целевая функция пригодна для оптимизации любого многопроводного МФ; интервально-временной критерий для 4-проводного МФ получен в аналитическом виде; апробировано выравнивание временных интервалов между импульсами разложения; целевая функция с учетом массогабаритного критерия пригодна для оптимизации любого МФ.

В подразделе 5.3 выполнено моделирование многопроводных МФ с учетом влагозащитного покрывающего слоя. Выполнены моделирование и оптимизация посредством ЭП МФ с покрывающим слоем (лак ЭП-9114): 3-проводного – с ослаблением 16,2 раза, импульса до 100 пс, а также 4-проводного – с ослаблением 28 раз, импульса с длительностью до 180 пс.

6. Использование многопроводных полосковых структур для расщепления сверхкороткого импульса в системах его генерации

В подразделе 6.1 описаны основные подходы к моделированию, выбраны структуры для моделирования, а также 5 конфигураций их каскадного подключения. В подразделе 6.2 рассмотрено формирование цуга биполярных импульсов в МПЛП, а также вычислен максимальный энергетический КПД формирования цуга затухающих колебаний (отношение энергии выходного и входного сигналов) для двух случаев: выходного сигнала с учетом основного импульса, пришедшего в конец МПЛП (который имеет наибольшую энергию) и без него. Наиболее выраженный уровень цуга биполярных импульсов, а также наибольшее значение (8,38%) КПД преобразования (без основного импульса) достижим при каскадном соединении зеркально-симметричной структуры (рисунок 6.1*а*). Также приемлем (6,8%) результат конфигурации из каскадного соединения 4 отрезков 5-проводной структуры. В подразделе 6.3 рассмотрено формирование цуга униполярных импульсов в МПЛП, а также вычислен максимальный энергетический КПД формирования цуга затухающих колебаний с помощью модальной фильтрации. Наиболее приемлемой оказалась структура из 3-х последовательно включенных зеркально-симметричных линий (рисунок 6.1*б*), поскольку она дает не только максимальный КПД преобразования (16,6%), но и периодический характер колебаний.

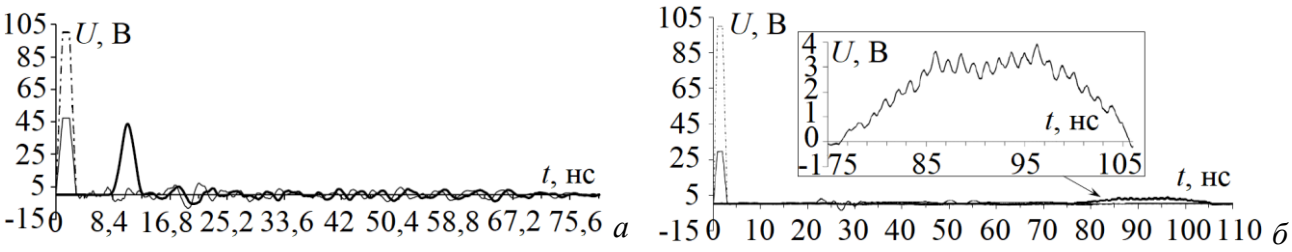

Рисунок 6.1 – $E(t)$ (-·-), $U(t)$ на входе (—) и выходе (—) структуры из 3-х каскадов зеркально-симметричной линии при формировании цуга биполярных (*а*) и униполярных (*б*) импульсов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования: Увеличивая N до 5, посредством ЭП можно уменьшить амплитуду сигнала до 4,5 раза относительно начала линии, тогда как при оптимизации посредством ГА возможно получить лучший результат. В результате измерений получены амплитуды напряжения на выходе МПЛ в 6,6; 11,5; 13,7; 12,6 и 15,3 раза (для N=1–5) меньше амплитуды ЭДС (ослабление входного сигнала от N=2 до N=5 на 33%). Сравнены результаты вычислительного и натурного экспериментов для 5 структур на частотах от 10 МГц до 10 ГГц. Полоса пропускания макетов составляет ≈0,55 ГГц. Длительность разлагаемого СКИ с ослаблением 4 раза максимизирована за счет равенства временных интервалов импульсов разложения. Показана максимизация длительности СКИ, полностью разлагаемого в многопроводных МФ, за счет максимизации разности задержек между первым и последним импульсами разложения. При оптимизации с помощью ГА достигнута амплитуда напряжения на выходе 0,03619 В, что на 13% меньше результата ЭП (0,040925 В). Поэтому целесообразна комплексная оптимизация посредством

ЭП и ГА. При оптимизации 3-проводного МФ с помощью ГА по амплитудному и трем временным критериям достижима меньшая (на 18%) амплитуда напряжения на выходе, чем по амплитудному критерию; при оптимизации 3-проводного МФ с помощью ГА по амплитудному, трем временным и массогабаритному критерию достижима меньшая (на 47%) амплитуда напряжения на выходе, чем по амплитудному и трем временным критериям; при оптимизации 4-проводного МФ с помощью ГА по амплитудному, трем временным критериям и критерию согласования, достижима меньшая (на 63%) амплитуда напряжения на выходе, чем при оптимизации 3-проводного МФ с помощью ГА по амплитудному и временным критериям.

Рекомендации: многопроводные МФ могут быть использованы при разработке специализированного электронного оборудования и бортовой аппаратуры различными предприятиями, например АО «ИСС»; амплитудные и временные критерии, формулировка многокритериальной целевой функции, ввиду своей универсальности, могут быть использованы при оптимизации различных МФ; подходы к моделированию и оптимизации могут быть использованы в учебном процессе вузов.

Перспективы дальнейшей разработки темы: детальное исследование МФ с круговой симметрией; оптимизация многопроводных МФ под конкретные цепи и устройства; структурная оптимизация МФ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Белоусов А.О. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 124–128.
2. Белоусов А.О. Экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в многопроводной микрополосковой линии / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2016. – № 3 (19). – С. 51–54.
3. Газизов Р.Р. Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов, Т.Т. Газизов // Труды МАИ. – Вып. 89.
4. Жечев Е.С. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Е.С. Жечев, Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №2. – С. 162–179.

Статьи в журналах, входящих в Q1 WoS или Scopus

5. Belousov A.O. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Complexity. – Vol. 2018. – 2018. – P. 1–15.
6. 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. – Vol. 11 (7), No. 883. – 2019. – P. 1–25.

Статьи в журналах, индексируемых в WoS и Scopus

7. Belousov A.O. Optimization of multiconductor modal filters using various criteria with different weighting coefficients / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series. – 2018. – Vol. 1015, No. 2. – P. 1–6.

8. Belousov A.O. Quasi-static and electrodynamic simulation of reflection symmetric modal filter time response on ultra-short pulse excitation / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky // Journal of physics: conf. series. – 2018. – Vol. 1015, No. 3. – P. 1–5.

9. Chernikova E.B. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander line of four cascaded half-turns / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // IOP Conf. Ser.: Mat. Science and Eng. – 2019. – Vol. 597, No. 1. – P. 1–6.

10. Chernikova E.B. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander lines of two cascaded half-turns / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // IOP Conf. Ser.: Mat. Science and Eng. – 2020. – Vol. 774, No. 1. – P. 1–5.

11. 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: conf. series. – 2019. – Vol. 1353, No. 1. – P. 1–6.

12. Nosov A.V. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition / A.V. Nosov, A.O. Belousov, R.S. Surovtsev and T.R. Gazizov // Journal of physics: conf. series. – 2019. – Vol. 1353, No. 1. – P. 1–6.

13. Belousov A.O. The use of multiconductor strip structures for splitting an ultrashort pulse in its generation systems / A.O. Belousov, I.V. Romanchenko and T.R. Gazizov // Journal of physics: conf. series. – 2019. – Vol. 1399, No. 2. – P. 1–7.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

14. Belousov A.O. Maximization of duration of ultrashort pulse that is completely decomposed in multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2016). – Russia, Moscow, May 12–14, 2016. – P. 1–4.

15. Belousov A.O. Optimization of parameters of multiconductor modal filters for protection against ultrashort pulses / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Russia, Altai, June 30–July 4, 2016. – P. 67–70.

16. Gazizov R.R. Influence of ultrashort pulse duration on localization of crosstalk peak values in PCB of spacecraft autonomous navigation system / R.R. Gazizov, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of Int. Sib. Conf. on cont. and communicat. (SIBCON–2017). – Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017. – P. 1–6.

17. Belousov A.O. Optimization of three-conductor microstrip line modal filter by heuristic search and genetic algorithms / A.O. Belousov, T.T. Gazizov,

T.R. Gazizov // Proc. of Int. Sib. conf. on cont. and communicat. (SIBCON–2017). – Astana, Kaz., June 29–30, 2017. – P. 1–4.

18. Orlov P.E. Method of lay-out of a multilayer PCB for circuits with triple reservation / P.E. Orlov, E.N. Buichkin, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of Int. Sib. conf. on control and communicat. (SIBCON–2017). – Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017. – P. 1–4.

19. Gazizov R.R. Influence of ultrashort pulse duration on its peak values localization in PCB of spacecraft autonomous navigation system / R.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov, A.O. Belousov // 18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotech. and Elect. Devices EDM. – Russia, Altai, June 29–July 3, 2017. – P. 69–74.

20. Belousov A.O. Experimental confirmation of the modal filtration in four- and five-conductor microstrip lines / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotech. and Elect. Devices EDM. – Russia, Altai, June 29–July 3, 2017. – P. 46–49.

21. Gazizov R.R. Optimization of ultrashort pulse duration with usage of genetic algorithms by criteria of peak voltage maximization in PCB bus / R.R. Gazizov, T.T. Gazizov, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // 2017 Sib. Symp. on Data Science and Eng. (SSDSE). – Russia, Novosibirsk, Apr.12–13, 2017. – P.69–73.

22. Belousov A.O. Multicriteria optimization of multiconductor modal filters by genetic algorithms / A.O. Belousov, T.T. Gazizov, T.R. Gazizov // 2017 Sib. Symp. on Data Science and Eng. (SSDSE). – Russia, Novosibirsk, April 12–13, 2017. – P. 65–68.

23. Belousov A.O. Multicriteria optimization of four-conductor modal filter by genetic algorithms / A.O. Belousov, T.T. Gazizov, T.R. Gazizov // 2017 Int. Multi-Conf. on Eng., Comp. and Inf. Sciences (SIBIRCON). – Russia, Novosibirsk, Sep. 18–22, 2017. – P. 445–448.

24. Belousov A.O. Frequency characteristics of multiconductor microstrip modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // XI Int. IEEE Scientific and Tech. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". – Omsk, Russian Federation, Nov. 14–16, 2017. – P. 1–4.

25. Belousov A.O. Simulation of the time response in multiconductor microstrip modal filters with separate accounting for losses in conductors and dielectrics / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Moscow Workshop on Electr. and Networking Tech. (MWENT–2018). – Moscow, Russia, Mar. 14–16, 2018. – P.1–5.

26. Chernikova E.B. Comparative analysis of microstrip and reflection symmetric four-conductor modal filters / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Int. Sib. Conf. on cont. and com. (SIBCON–2019). – Tomsk, Russia, April 18–20, 2019. – P. 1–4.

27. Zhechev Y.S. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter / Y.S. Zhechev, E.B. Chernikova, A.O. Belousov // 20th Int. Conf. of Young Spec. on Micro/Nanotech. and Elec. Dev. EDM. – Russia, Altai, June 29–July 3, 2019. – P. 1–4.

28. Chernikova E.B. Analysis of frequency characteristics of a reflection symmetric modal filter / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // 2019 Int. Multi-Conf. on Eng., Comp. and Inform. Sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. – P. 0212–0216.

29. Chernikova E.B. Method for detecting additional pulses in the time response of structures with modal decomposition / E.B. Chernikova, A.O. Belousov // 2019 Int. Multi-Conf. on Eng., Comp. and Inform. Sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. – P. 0245–0249.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617718. Оптимизация трехпроводного микрополоскового модального фильтра по критерию минимизации амплитуды выходного сигнала. Автор: Белоусов А.О. Заявка №2017614519. Дата поступления 16 мая 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 июля 2017 г.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618366. Программа для многокритериальной оптимизации четырехпроводного микрополоскового модального фильтра с учетом критерия согласования. Автор: Белоусов А.О. Заявка № 2018615231. Дата поступления 23 мая 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 июля 2018 г.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618430. Программа для оптимизации четырехпроводного микрополоскового модального фильтра по критерию минимизации амплитуды выходного сигнала. Авторы: Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Заявка № 2018615225. Дата поступления 23 мая 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12 июля 2018 г.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664930. Многокритериальная оптимизация трехпроводного микрополоскового модального фильтра с разными весовыми коэффициентами. Автор: Белоусов А.О. Заявка № 2019664050. Дата поступления 07.11.2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.11.2019 г.