

На правах рукописи



Малыгин Константин Петрович

**Помехозащитные структуры на основе витка
меандровой микрополосковой линии
с улучшенными характеристиками**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

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

Научный руководитель – **Носов Александр Вячеславович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, ТУСУР

Официальные оппоненты – **Гизатуллин Зиннур Марселевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»;

Дмитренко Анатолий Григорьевич
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной математики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

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

Защита состоится 10 декабря 2024 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, 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/da5po8e0>

Автореферат разослан « ____ » октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Внедрение радиоэлектронных средств (РЭС) в различные сферы нашей жизни заставляет разработчиков обеспечивать электромагнитную совместимость (ЭМС) для надежной и безопасной работы РЭС. Миниатюризация и повышение быстродействия РЭС, диктуемые современными технологическими трендами, приводят к росту плотности трассировки и частоты сигнала. Это, в свою очередь, делает РЭС уязвимыми к воздействию электромагнитных помех (ЭМП). Особую опасность для РЭС представляют мощные сверхширокополосные (СШП) помехи, в том числе сверхкороткие импульсы (СКИ), характеризующиеся малой длительностью (в нано- и субнаносекундных диапазонах). Широкий частотный спектр таких СКИ позволяет им проникать внутрь РЭС, вызывая сбои и даже повреждения компонентов. Развитие генераторов СШП импульсов высокой мощности приводит к реальной угрозе выведения РЭС из строя, что делает актуальной их защиту. Для защиты РЭС от ЭМП применяются разные конструктивные (экранирование, заземление, оптимизация импеданса цепей питания) и схемотехнические (фильтрация, ограничительные устройства) решения. Однако их эффективность ограничена влиянием паразитных параметров выводов компонентов, недостаточным быстродействием, низким напряжением пробоя и т.д. Поэтому актуальны совершенствование существующих и разработка новых подходов к защите РЭС от СШП помех.

Степень разработанности темы. Защита от мощных СШП воздействий активно исследуется как зарубежными (M. Backstrom, F. Brauer, J. Haseborg, F. Rachidi, W. Radasky, F. Sabath и др.), так и отечественными (З.М. Гизатуллин, Р.В. Киричек, С.Ф. Чермошенцев и др.) исследователями. Значительный вклад в исследование стойкости электронных систем к помехам, создание методик измерений и расчета внесли Б.Б. Акбашев, Л.Н. Кечиев, В.Ю. Кириллов, Л.О. Мырова и др. Разработкой фильтров с распределенными параметрами занимаются такие зарубежные ученые, как M. Camp, R. Krzikalla, T. Weber и др. Среди отечественных ученых значительный вклад в исследование связанных линий внесли Б.А. Беляев, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов, А.Н. Сычев и др. Известны устройства защиты на основе модального разложения в связанных линиях передачи, исследуемые под руководством Т.Р. Газизова в ТУСУРе. Они позволяют реализовать защиту не отдельными компонентами, а за счет специальной топологии печатных проводников. Несмотря на активные исследования модальных фильтров (А.О. Белоусов, Е. Жечев, А.М. Заболоцкий, В.П. Костелецкий, Самойличенко М.А., И.Е. Самотин, Р.Р. Хажibeков, Е.Б. Черникова) и защитных меандровых линий (МЛ) (С. Карри, З.М. Кенжегулова, А.В. Носов, Р.С. Суровцев) остаются важные неисследованные вопросы, например, уменьшение габаритов устройств на основе МЛ и рост ослабления помех в них.

Цель работы – выявить возможности увеличения ослабления сверхкоротких импульсов и уменьшения габаритов устройств защиты на основе витка меандровой микрополосковой линии. Для её достижения надо решить следующие задачи:

1. Сделать обзор устройств защиты, в том числе на основе витка меандровой микрополосковой линии.

2. Выполнить предварительную оптимизацию витка меандровой микрополосковой линии.

3. Исследовать возможности улучшения характеристик устройств защиты на основе витка меандровой микрополосковой линии.

4. Экспериментально исследовать устройства защиты на основе витка меандровой микрополосковой линии с улучшенными характеристиками.

Объектом исследования является виток меандровой микрополосковой линии (МПЛ), а **предметом** – улучшение его помехозащитных свойств.

Научная новизна

1. Предложена трассировка помехозащитной структуры на основе витка меандровой микрополосковой линии для дополнительного ослабления сверхкороткого импульса, отличающаяся тем, что виток дополнительно свернут в витки с усиленной связью.

2. Впервые показано, что добавление двух пассивных проводников в структуру витка меандровой микрополосковой линии и сворачивание такой структуры в дополнительные витки увеличивает ослабление сверхкороткого импульса.

3. Доказаны возможности неизменного ослабления сверхширокополосной помехи в витке меандровой микрополосковой линии, а также увеличения полосы пропускания и уменьшения его площади, отличающиеся добавлением к нему двух заземленных на концах проводников, его сворачиванием в дополнительные витки с усиленной связью и покрытием из радиопоглощающего материала.

Теоретическая значимость

1. Оценено влияние температуры, воды и льда на характеристики витка меандровой МПЛ с симметричным поперечным сечением.

2. Изучены особенности влияния сворачивания витка меандровой МПЛ в неосновные витки с усиленной связью на ослабление СКИ.

3. Оценено влияние добавления к витку меандровой МПЛ двух пассивных проводников на ослабление СКИ.

4. Сформулированы условия, обеспечивающие полное разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды в симметричной и асимметричной меандровых МПЛ с двумя пассивными проводниками.

5. Выявлено, что за счет наличия перемычек и связи между неосновными витками при сворачивании меандровой МПЛ возникают отраженные импульсы разной полярности, дополнительно уменьшающие амплитуду СКИ на её выходе.

Практическая значимость

1. Получено максимальное ослабление СКИ в свернутом витке меандровой МПЛ 5,6 раза, а при добавлении к нему двух пассивных проводников – 17,6 раза.

2. Получено ослабление 17 раз СШП импульса со спектром от 0,1 до 6 ГГц и 20,5 раза затухающей синусоиды в свернутом витке меандровой МПЛ с двумя заземленными проводниками и покрытием из радиопоглощающего материала ЗИПСИЛ 601 РПМ-01.

3. Выявлено и продемонстрировано уменьшение площади меандровой МПЛ в 6,74 раза при неизменном уровне ослабления СШП импульса со спектром от 0,1 до 6 ГГц при сворачивании основного витка, добавлении двух заземленных

проводников и покрытия радиопоглощающим материалом ЗИПСИЛ 601 РПМ-01.

4. Продемонстрировано увеличение в 5,88 раза полосы пропускания меандровой МПЛ при неизменном уровне ослабления СШП импульса со спектром от 0,1 до 6 ГГц при сворачивании основного витка, добавлении двух заземленных проводников и покрытия радиопоглощающим материалом ЗИПСИЛ 601 РПМ-01.

5. Отработана оптимизация генетическими алгоритмами (ГА) и эволюционными стратегиями (ЭС), по одному и нескольким критериям, меандровой МПЛ, в том числе с учетом изменения температуры и покрытой водой и льдом.

6. Получены 3 патента на изобретение устройств защиты от СКИ на основе меандровой МПЛ и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

7. Результаты использованы в АО «РЕШЕТНЁВ», НИР по грантам РФФИ, госзаданий и учебном процессе ТУСУРа (три акта внедрения).

Методология и методы исследования. В работе использованы моделирование методами моментов, конечных разностей во временной области и матриц линий передачи, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и генетическими алгоритмами, а также лабораторный эксперимент на базе векторного анализатора цепей и осциллографа вычислительного комбинированного.

Положения, выносимые на защиту

1. Сворачивание витка меандровой микрополосковой линии в витки с усиленной связью позволяет ослабить до 5,6 раза помеховое импульсное воздействие длительностью до 300 пс и уменьшить занимаемую площадь в 2,2 раза.

2. Добавление двух пассивных проводников с нагрузками на их концах по 50 Ом к витку меандровой микрополосковой линии с ассиметричным поперечным сечением и его сворачивание в 21 неосновной полувиток позволяют ослабить до 17,6 раза помеховое импульсное воздействие длительностью до 300 пс.

3. Добавление к витку меандровой микрополосковой линии двух заземленных проводников, его сворачивание в витки с усиленной связью и нанесение на него покрытия из радиопоглощающего материала ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 позволяет уменьшить его площадь до 6,7 раза при неизменном ослаблении сверхширокополосной помехи со спектром от 0,1 до 6 ГГц и увеличить полосу пропускания полезного сигнала в 5,88 раза.

Достоверность результатов основана на корректном применении теории линий передачи, совпадении результатов квазистатического и электродинамического моделирования и их согласованности с результатами измерений на сертифицированных и поверенных аппаратно-программных комплексах.

Использование результатов исследований

1. 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, проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.

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

3. НИР «Математический аппарат для синтеза пассивных помехоподавляющих полосковых устройств с асимметричной структурой на основе модальных технологий», грант РФФ 21-79-00161, 2021–2023 гг.

4. НИР «Методология обеспечения электромагнитной совместимости средств функционального поражения электромагнитным излучением с другими радиоэлектронными средствами в составе комплекса противодействия беспилотным летательным аппаратам», грант РФФ 22-29-01331, 2022–2023 гг.

5. НИР «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий», госзадание FEWM-2024-0005, 2024–2026 гг.

6. НИР «Новые гибридные устройства для расщепления опасных импульсов в целях защиты радиоэлектронной аппаратуры», грант РФФ 22-79-00103, 2022–2024 гг.

7. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах грантов РФФ (21-79-00161 2021–2023 гг., 22-29-01331 2022–2023 гг., 22-79-00103 2022–2024 гг., 24-79-00102 2024–2026 гг.) и государственного задания (FEWM-2020-0041 2020–2022 гг., FEWM-2022-0001 2022–2023 гг., FEWM-2024-0005 2024–2026 гг.).

Результаты докладывались на следующих конференциях: Межд. научно-практич. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018, 2019, 2021 гг.; Всерос. научно-технич. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-25-2019)», Томск, 2019 г.; Всерос. научно-технич. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)», г. Москва, 2022 г.; Int. IEEE scientific and technical conf. «International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)», г. Магнитогорск, 2022 г.; Int. IEEE scientific and technical conf. «Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2025)», г. Сочи, 2023 г.; Межд. научно. конф. «Перспективы развития науки, инженерии, естественно-научного, технического и цифрового образования (ASEDU-III)», г. Красноярск, 2022 г.

Публикации. Результаты опубликованы в 21 работе: 3 статьи в изданиях из перечня ВАК; 2 статьи в журналах, индексируемых SCOPUS (Q1/Q2); 3 статьи в журналах, индексируемых в WoS и SCOPUS; 4 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 4 докладов в трудах других конференций; 3 патента на изобретения; 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 264 наименований, 2 приложения. Объем диссертации с приложениями – 149 с., в т.ч. 81 рисунок и 65 таблиц.

Личный вклад. Цель и задачи сформулированы совместно с научным руководителем. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или

совместно с научным руководителем. Личный вклад автора состоит в моделировании разными методами, разработке прототипов и экспериментальных исследованиях. Часть результатов получена совместно с *Суровцевым Р.С.*

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Защита от электромагнитных воздействий: обзор

В подразделе 1.1 показана актуальность защиты РЭС от мощных СШП воздействий и приведен обзор источников преднамеренных электромагнитных воздействий (ЭМВ). В подразделе 1.2 представлены традиционные решения для защиты РЭС от ЭМВ, среди которых выделены полосковые устройства защиты на основе модального разложения импульсного сигнала. В подразделе 1.3 приведены методы, модели и подходы к оптимизации для полосковых структур. В подразделе 1.4 сформулированы цель и задачи работы.

2. Предварительная оптимизация витка меандровой микрополосковой линии

В подразделе 2.1 выполнена однокритериальная оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой МПЛ. Сформулирована целевая функция, обеспечивающая равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод витка (Z_{cp}) сопротивлению 50 Ом. Выявлено, что при увеличении числа поколений до 80 сходимость Z_{cp} улучшается (максимальное отклонение 0,33%), а сходимость параметров w и s не наступает.

В подразделе 2.2 выполнена многокритериальная оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой МПЛ. Сформулирована целевая функция из двух критериев: равенства интервалов между импульсами разложения и минимизации амплитуды. Все полученные посредством ГА параметры поперечного сечения меандровой МПЛ обеспечивают выполнение сформулированных критериев. Получено ослабление СКИ не менее 2,34 раза.

В подразделе 2.3 в результате анализа влияния температуры на характеристики витка меандровой МПЛ выявлены: незначительное влияние изменения температуры T в диапазоне от минус 50 до 150°C на характеристики витка; характер влияния температуры отдельно на каждую характеристику витка; максимальные отклонения характеристик витка при изменении температуры во всем диапазоне изменяемых геометрических параметров – 3,23% и 2,42% для погонных задержек четной и нечетной мод соответственно, 0,26% для максимальной амплитуды в конце витка и 3% для среднего геометрического значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии. Выявлено, что выбором параметров линии можно уменьшить влияние T на ее характеристики.

В подразделе 2.4 оптимизирован виток меандровой МПЛ с помощью ГА и ЭС с температурной моделью. Найдены наборы оптимальных геометрических параметров, обеспечивающие $Z_{cp}=50$ Ом и U_{min} на выходе витка при $T= -50, 25$ и 150°C. Оптимизация с помощью ЭС дала результаты в 7 раз быстрее.

В подразделе 2.5 выполнен анализ влияния воды и льда на характеристики витка меандровой МПЛ. Показано, что оно значительно и различно для каждой характеристики. Например, задержки импульсов четной и нечетной мод увеличились на 55,2 и 18% для витка со льдом и на 511,4 и 173,8% для витка с водой.

В подразделе 2.6 оптимизирован виток меандровой МПЛ в воде или льде с помощью ГА и ЭС, оказавшихся в 3,3 раза быстрее, чем ГА. Получены наборы оптимальных геометрических параметров для витка меандровой МПЛ, дающие минимальную амплитуду на выходе витка для всех трех случаев (лед, вода и воздух).

3. Совершенствование витка меандровой микрополосковой линии

В подразделе 3.1 анализировалось разложение СКИ в витке меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Рассмотрены две схемы соединений (рисунок 3.1).

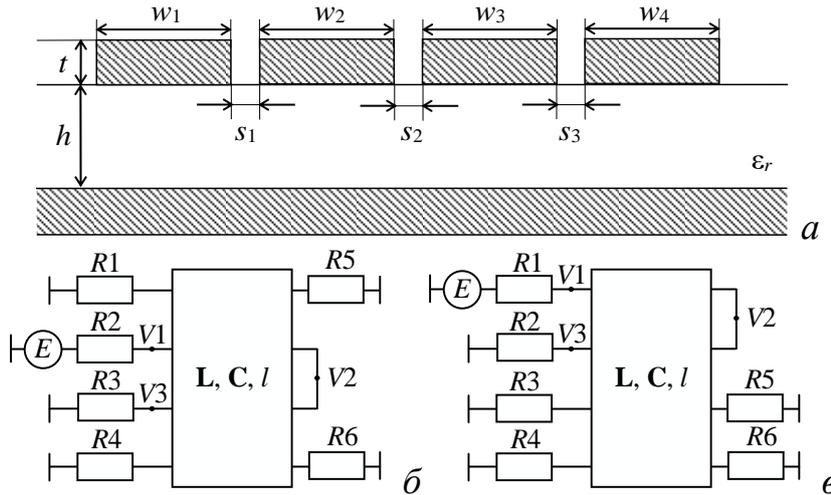


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение (а), схемы 1 (б) и 2 (в) меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками

Также рассмотрены различные граничные условия пассивных проводников и получены оптимальные параметры по критерию минимизации амплитуды на выходе витка. Кроме того, проанализировано влияние геометрических параметров витка на задержки каждого импульса разложения и амплитуду СКИ на его выходе и

сформулированы условия разложения СКИ.

Найдены оптимальные параметры витка, обеспечивающие разложение СКИ и минимизацию его амплитуды. Ослабление СКИ (здесь и далее, относительно $E/2$) при оптимальных параметрах в схеме 1 составило 6,4 раза, а 2 – 10,6 раза.

В подразделе 3.2 анализировалось разложение СКИ в свернутом витке меандровой МПЛ (рисунок 3.2) при изменении s_{n1} , s_{n2} , s_{n3} , s_{n4} по отдельности и одновременно. Выявлено, что их уменьшение уменьшает U_{\max} . Анализ N -норм показал, что уменьшение s_n уменьшает вероятности электрического пробоя, дугового разряда и выгорания компонента. При этом вероятность пробоя диэлектрика не изменяется, а вероятность повреждения компонента из-за общей энергии импульса увеличивается. Вычислены максимальные ослабления в трёх разных САПР: 3,98, 4,93 и 4,95 раза. Получена качественная и количественная согласованность результатов. Кроме того, сворачивание витка меандровой МПЛ позволило уменьшить площадь конечной структуры в 2,2 раза при $s_n=0,1$ мм.

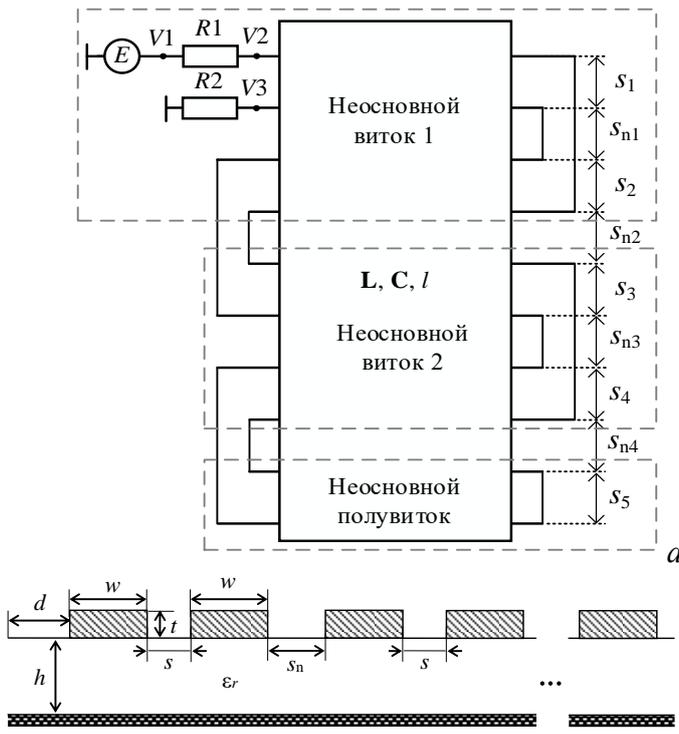


Рисунок 3.2 – Схема соединения свернутого витка меандровой МПЛ (а) и её поперечное сечение (б)

4. Экспериментальное исследование усовершенствованных структур

В подразделе 4.1 экспериментально подтверждено разложение СКИ в структуре свёрнутой меандровой МПЛ (структура 1) со следующими геометрическими параметрами: $d=3w$, $w=300$ мкм, $s=125$ мкм, $t=18$ мкм, $h=450$ мкм, $\epsilon_r=10,2$ (ламинат FSD1020T), $l=1$ м. Для минимизации габаритов структура 1 свернута в 3 витка (структура 2). Это уменьшило габариты до 46×36 мм. Изготовлены прототипы структуры 2 с расстояниями между проводниками 125 и 200 мкм для оценки их влияния на форму и амплитуду СКИ. Прототипы структур 1 и 2 представлены на рисунке 4.1.

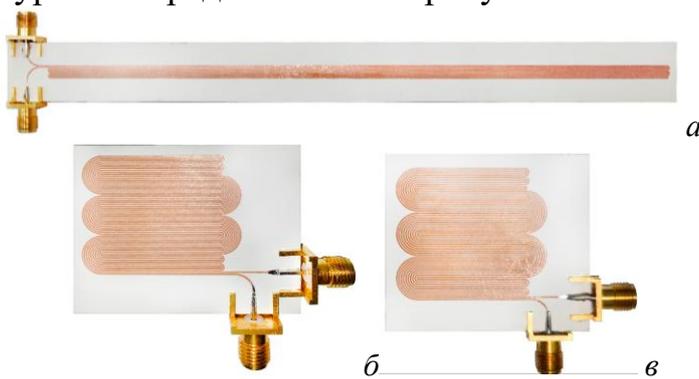


Рисунок 4.1 – Изготовленные прототипы структур 1 (а) и 2 при $s=125$ (б), 200 (в) мкм

Экспериментальные исследования выполнены двумя методами для повышения достоверности: 1 – измерение во временной области с помощью осциллографа С9–11, 2 – измерение S -параметров с помощью ВАЦ Agilent Technologies E5071C с последующим анализом во временной области в ПО ADS. Кроме этого, выполнено электродинамическое моделирование структур 1 и 2 в САПР EMPro в диапазоне частот от 0 до 10 ГГц.

В подразделе 3.3 показано, что сворачивание витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками в неосновные витки с усиленной связью приводит к появлению дополнительных импульсов, вызванных отражениями и перекрестными помехами. С учетом этого выполнена структурно-параметрическая оптимизация витка по критериям разложения СКИ и минимизации его амплитуды. В результате найдены оптимальные геометрические параметры и количество неосновных витков. Ослабление СКИ составило 28,8 раза.

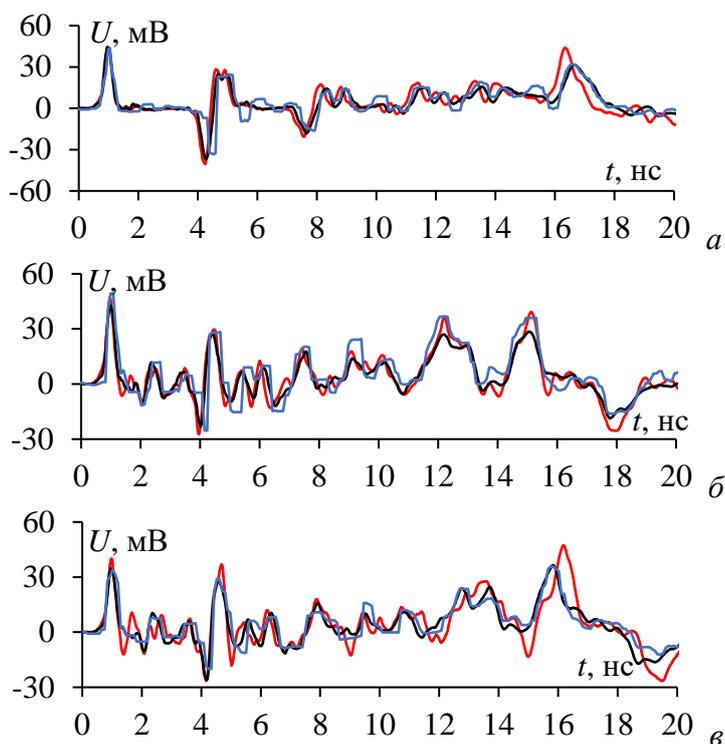


Рисунок 4.2 – Формы напряжения на выходе структур 1 (а) и 2 при $s=125$ (б), 200 (в) мкм, полученные методами 1 (—) и 2 (---) и в EMPro (···)

На рисунке 4.2 представлены формы напряжения на выходе структур, полученные методами 1 и 2, а также в EMPro.

Во всех случаях на выходе структур наблюдается последовательность импульсов с U_{\max} до 49,3 мВ. Результаты двух методов и моделирования согласуются. U_{\max} определяется импульсом перекрестной помехи в структурах 1 и 2 при $s=125$ мкм, а при $s=200$ мкм – импульсом в диапазоне 15–17 нс. С ростом s уменьшаются связь между проводниками и амплитуда перекрестной помехи, но растут амплитуды импульсов разложения. Разница U_{\max} структуры 1, полученных методом 1 и моделированием, составляет 0,69%, а струк-

туры 2 при $s=125$, 200 мкм – 4,23 и 32,2% соответственно. Разница U_{\max} структуры 1, полученных методом 2 и моделированием составляет 1,59%, а структуры 2 при $s=125$, 200 мкм – 10,8 и 29,7% соответственно. Максимальные ослабления на выходе структур 1 и 2 с $s=125$, 200 мкм составили 5,6, 5,8 и 6,9 раза соответственно.

Анализ N -норм показал, что $N1$ в среднем в 6,1 раза меньше, чем в тракте без линии, что снижает вероятность электрического пробоя. Минимум $N1$ получен при $s=200$ мкм (ослабление в 6,94 раза). $N2$ уменьшилась в среднем в 5,2 раза, что снижает вероятность искрения. Минимум $N2$ получен при $s=125$ мкм. $N3$ уменьшилась незначительно (в среднем на 2,5%), что снижает вероятность диэлектрического пробоя. Однако, $N4$ увеличилась в среднем в 2,4 раза, что обусловлено учетом импульсов отрицательной полярности. $N5$ уменьшилась в среднем в 2 раза, что снижает вероятность выгорания компонентов.

Выполнен анализ целостности сигналов. На рисунке 4.3 показаны частотные зависимости $|S_{21}|$ для структур. Видно, что полосы пропускания для структур 1 и 2 при $s=200$, 125 мкм составили 84, 46 и 98 МГц соответственно.

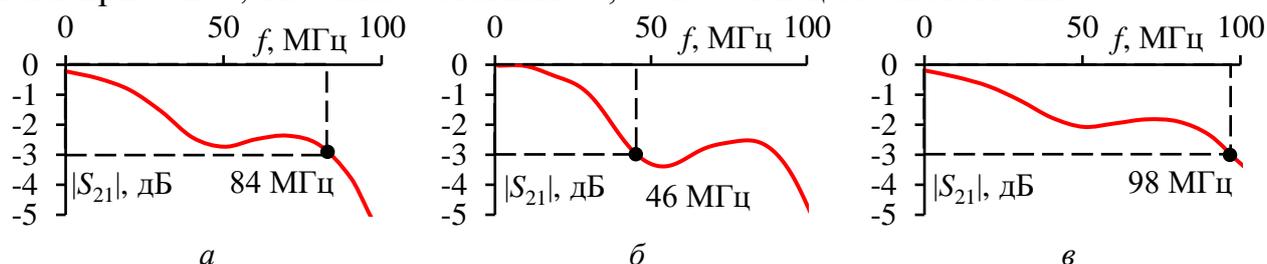


Рисунок 4.3 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ для структур 1 (а), и 2 при $s=200$ (б), 125 (в) мкм

Поэтому анализ проводился с использованием псевдослучайной двоичной последовательности из 10000 бит со скоростью передачи данных 50 и 100 Мбит/с. Для наглядности на рисунке 4.4 представлена глазковая диаграмма, полученная методом 2 и моделированием структуры 1. Видно, что «глаз» остается открытым, следовательно, вероятность появления битовых ошибок низка. Аналогичный результат получен для структуры 2 с разными s . Контур внутри диаграмм представляет результаты, полученные при моделировании.

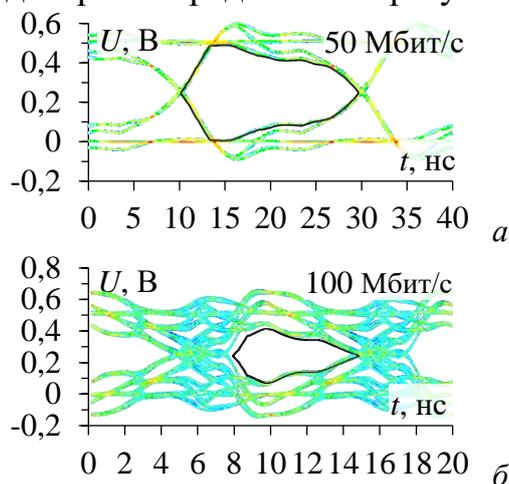


Рисунок 4.4 – Глазковые диаграммы структуры 1, полученные методом 2 и моделированием (—)

На основе полученных результатов можно определить потенциальную область применения структур 1 и 2 с $s=125, 200$ мкм. В частности, эти структуры могут быть использованы для передачи данных в различных интерфейсах, например, совместно с PLL1707 (Texas Instruments).

В подразделе 4.2 представлено экспериментальное подтверждение разложения СКИ в свернутом витке меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками (структура 3). Фото прототипа представлено на рисунке 4.5а. В результате оптимизации эвристическим поиском по критериям выполнения условий разложения СКИ и минимизации его амплитуды

найжены следующие параметры витка: $w_1=200$ мкм, $w_2=300$ мкм, $w_3=1900$ мкм, $w_4=600$ мкм, $t=18$ мкм, $s_1=s_2=s_3=s_4=400$ мкм, $h=450$ мкм и $l=1,6$ м, а в качестве диэлектрической подложки взят ламинат FSD1020T с $\epsilon_r=10,2$. Экспериментальные исследования выполнены с помощью методов 1 и 2 из п. 4.1. Также для достоверности выполнено электродинамическое моделирование. На рисунке 4.5б представлена установка для измерения частотных характеристик изготовленного прототипа.

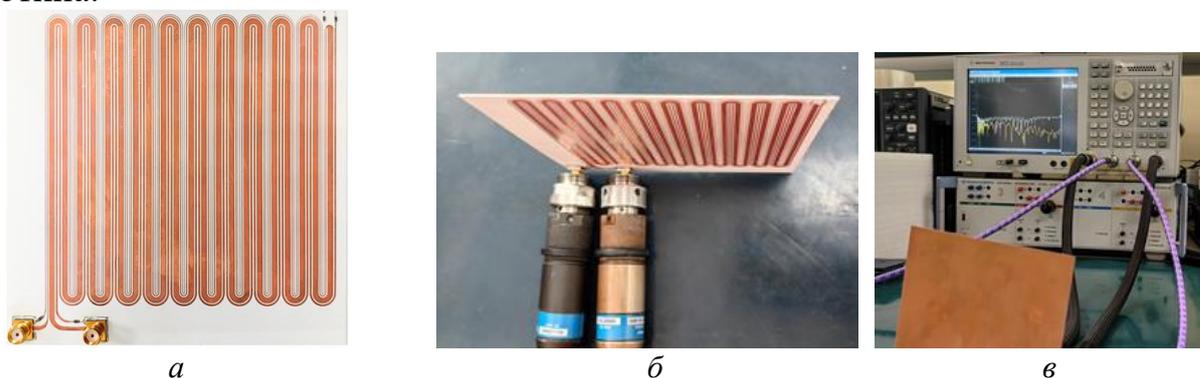


Рисунок 4.5 – Изготовленный прототип (а), подсоединённый прототип (б) и установка для измерения его частотных характеристик (в)

На рисунке 4.6 показаны формы напряжения на выходе структуры 3, полученные методами 1 и 2 и электродинамическим моделированием в EMPro.

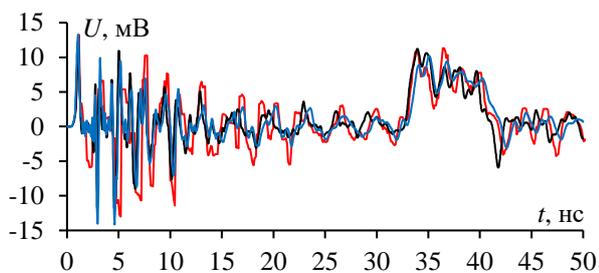


Рисунок 4.6 – Формы напряжения на выходе структуры 3, полученные методами 1 (—) и 2 (---) и электродинамическим моделированием (---) в EMPro

нове его измеренных S -параметров (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – N -нормы без структуры и с ней

Случай	$N1$	$N2 \cdot 10^9$	$N3 \cdot 10^{-11}$	$N4 \cdot 10^{-11}$	$N5 \cdot 10^{-6}$
1	0,25	1,5	8,11	8,53	3,51
2	0,014	0,19	6,745	13,95	0,827

$N1$ в случае 2 меньше в 17,6 раза, что значительно снижает вероятность электрического пробоя. $N2$ уменьшилась в 7,8 раза, что уменьшает вероятность искрения. $N3$ уменьшилась в 1,2 раза, что уменьшает вероятность диэлектрического пробоя. $N4$ увеличилась в 1,6 раза, что обусловлено ее учётом импульсов и с отрицательной полярностью. Наконец, $N5$ уменьшилась в 4,3 раза, что значительно уменьшает вероятность выгорания компонентов.

Рассмотрена возможность использования структуры 3 в сигнальных цепях, как в п. 4.1. На рисунке 4.7а приведена частотная зависимость $|S_{21}|$ до 10 ГГц, полученная методом 2. Показано, что частота среза составляет 6,6 МГц. Этого недостаточно для передачи полезного сигнала на высокой скорости. Тогда использован источник псевдослучайной двоичной последовательности длиной 10000 бит со скоростью передачи данных 12 Мбит/с, соответствующей USB 2.0 «Full-speed». На рисунке 4.7б представлена глазковая диаграмма, полученная методом 2, на которую добавлен контур маски, показывающий требования к форме передаваемого сигнала для USB 2.0 «Full-speed» (с накидным кабелем). Глаз остается открытым, поэтому вероятность битовых ошибок низка.

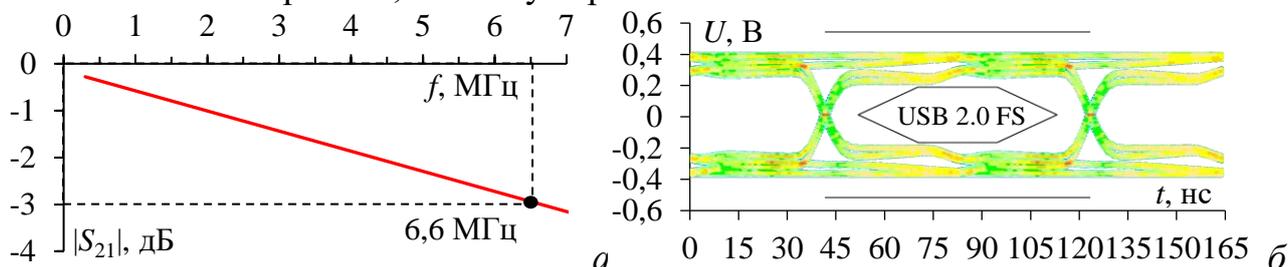


Рисунок 4.7 – Измеренная частотная зависимость $|S_{21}|$ (а) и глазковая диаграмма структуры 3, полученная методом 2 для 12 Мбит/с

Таким образом, структура 3 может применяться в низкоскоростных интерфейсах (например, USB 2.0 Low/Full-speed) и цепях питания постоянного тока, где допустимы фазовые искажения. Близкое расположение маски к глазу ограничивает использование в высокоскоростных режимах. Согласно IEC-2221A, линия подходит для цепей до 40 В и 15,6 мА.

Из рисунка 4.6 видно, что воздействующий СКИ стал на выходе прототипа последовательностью импульсов меньшей амплитуды. U_{\max} на выходе прототипа определяет импульс с отрицательной полярностью (-14,2 мВ). Видно, что результаты хорошо согласуются.

Вычислены N -нормы для двух случаев: 1 – в тракте 50 Ом без прототипа, 2 – на выходе прототипа на ос-

нове его измеренных S -параметров (таблица 4.1).

$N1$ в случае 2 меньше в 17,6 раза, что значительно снижает вероятность электрического пробоя. $N2$ уменьшилась в 7,8 раза, что уменьшает вероятность искрения. $N3$ уменьшилась в 1,2 раза, что уменьшает вероятность диэлектрического пробоя. $N4$ увеличилась в 1,6 раза, что обусловлено ее учётом импульсов и с отрицательной полярностью. Наконец, $N5$ уменьшилась в 4,3 раза, что значительно уменьшает вероятность выгорания компонентов.

Рассмотрена возможность использования структуры 3 в сигнальных цепях, как в п. 4.1. На рисунке 4.7а приведена частотная зависимость $|S_{21}|$ до 10 ГГц, полученная методом 2. Показано, что частота среза составляет 6,6 МГц. Этого недостаточно для передачи полезного сигнала на высокой скорости. Тогда использован источник псевдослучайной двоичной последовательности длиной 10000 бит со скоростью передачи данных 12 Мбит/с, соответствующей USB 2.0 «Full-speed». На рисунке 4.7б представлена глазковая диаграмма, полученная методом 2, на которую добавлен контур маски, показывающий требования к форме передаваемого сигнала для USB 2.0 «Full-speed» (с накидным кабелем). Глаз остается открытым, поэтому вероятность битовых ошибок низка.

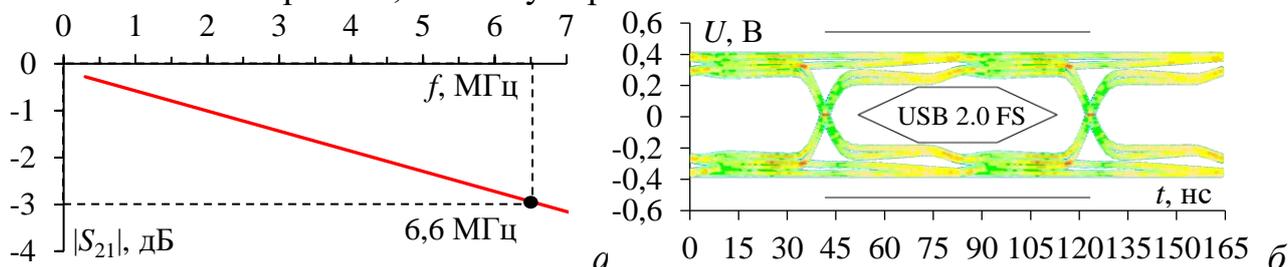


Рисунок 4.7 – Измеренная частотная зависимость $|S_{21}|$ (а) и глазковая диаграмма структуры 3, полученная методом 2 для 12 Мбит/с

Таким образом, структура 3 может применяться в низкоскоростных интерфейсах (например, USB 2.0 Low/Full-speed) и цепях питания постоянного тока, где допустимы фазовые искажения. Близкое расположение маски к глазу ограничивает использование в высокоскоростных режимах. Согласно IEC-2221A, линия подходит для цепей до 40 В и 15,6 мА.

В подразделе 4.3 экспериментально подтверждено ослабление СШП-импульса со спектром от 0,1 до 6 ГГц в свернутом витке меандровой МПЛ с двумя заземленными проводниками и покрытием из радиопоглощающего материала (РПМ) ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 (структура 4). Подложкой выбран материал FSD888T ($h=508$ мкм, $\epsilon_r=3,48\pm 0,05$, $\tan\delta=0,0012$ при 10 ГГц). Основные параметры: $t=18$ мкм, $w=s=200$ мкм, общая длина – 197 мм, площадь структуры – 253 мм². На рисунке 4.8 представлены поперечное сечение 4 основных проводников структуры 4 (когда она не свернута в витки), фото ее прототипа и схема соединений.

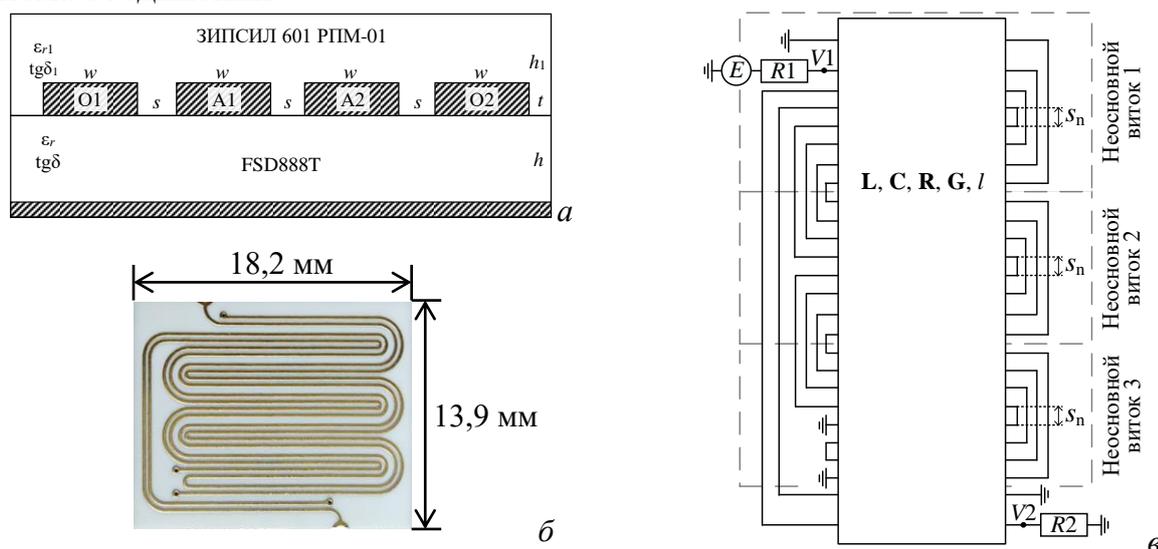


Рисунок 4.8 – Поперечное сечение 4 основных проводников структуры 4 (а), ее изготовленный прототип (б) и схема соединений (в)

РПМ приклеен к прототипу с помощью жидкого радиопоглощающего материала с аналогичными ему электрофизическими параметрами. Структура 4 без РПМ и с ним приведена на рисунке 4.9а, б. Для включения структуры 4 в измерительный тракт использованы коаксиально-микростриповые переходы с вносимым затуханием не более 0,5 дБ в диапазоне от 0 до 20 ГГц. В качестве ВАЦ использован Р4М-18 компании МИКРАН. Перед каждым измерением выполнялась ТОСМ-калибровка ВАЦ. S -параметры измерялись в диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Частотные зависимости параметров ЗИПСИЛ-601 РПМ-01 в диапазоне от 1 до 6 ГГц приведены на рисунке 4.9в.

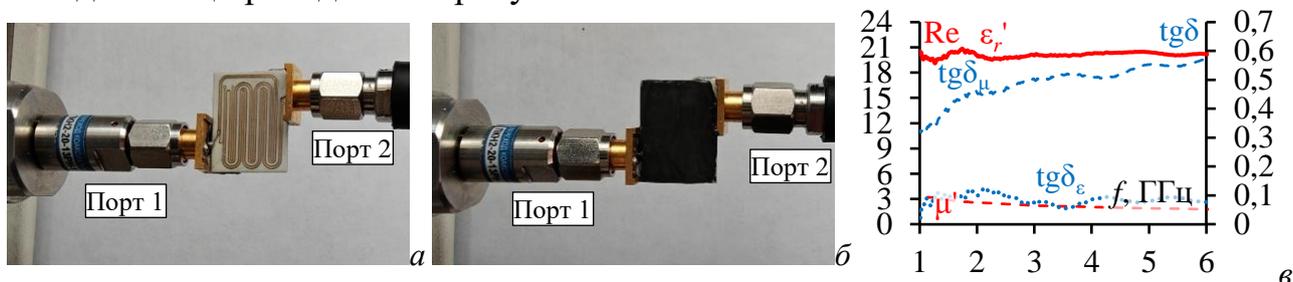


Рисунок 4.9 – Фотографии структуры 4 без РПМ (а) и с ним (б) и частотные зависимости параметров РПМ (в)

На рисунке 4.11а приведены измеренные и вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ структуры 4 с РПМ, с полосой пропускания 500 и 510 МГц соответственно. Результаты хорошо согласуются по характеру частотных

зависимостей, с отклонением между ними менее 7,8%. Кроме того, вычислены электродинамическим подходом S -параметры структуры 4 (рисунок 4.11б), но в несвернутом виде, без заземленных проводников и РПМ (структура 5). Видно, что полоса пропускания для структуры 5 составила 221 МГц, что в 2,26 раза меньше, чем для структуры 4 с той же общей длиной проводника и меньшей в 1,87 раза площади структуры.

Наконец, выполнена структурная оптимизация эвристическим поиском структуры 4 по критериям уменьшения ее площади и увеличения ее полосы пропускания с сохранением ослабления СШП импульса. В результате количество

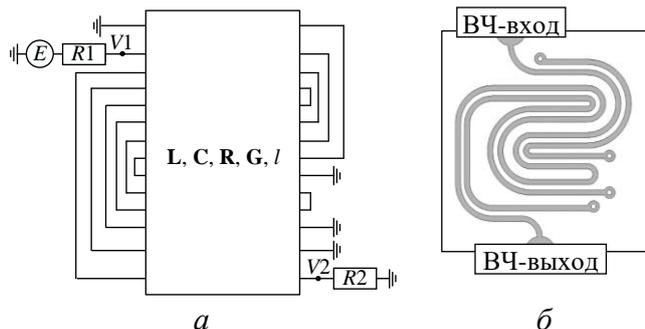


Рисунок 4.10 – Схема соединений (а) и топология (б) структуры 6

неосновных полувитков уменьшено до одного, а общая длина проводника и площадь структуры составили 37,1 мм и 70 мм², соответственно (структура 6 на рисунке 4.10). Таким образом её площадь в 6,74 раза меньше структуры 5, а полоса пропускания больше в 5,88 раза и составляет 1,31 ГГц (рисунок 4.11в).

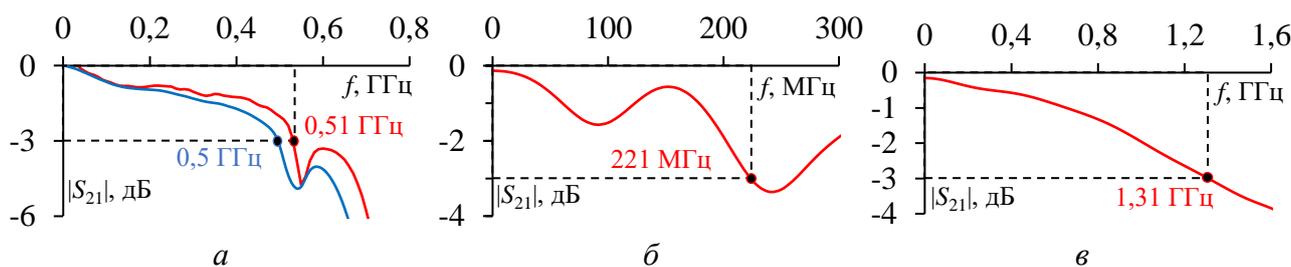


Рисунок 4.11 – Частотные зависимости $|S_{21}|$: измеренная и вычисленная для структуры 4 (а) и вычисленные для структур 5 (б) и 6 (в)

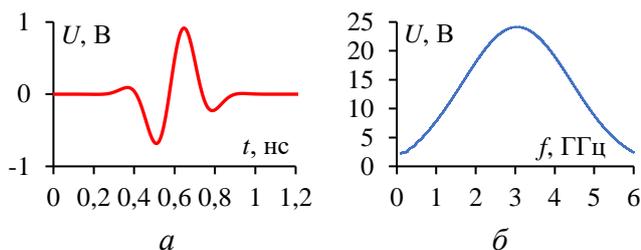


Рисунок 4.12 – Форма (а) и спектр (б) воздействия

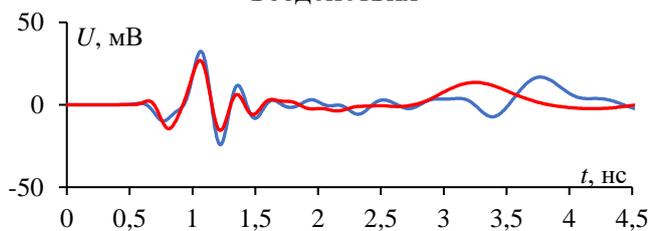


Рисунок 4.13 – Измеренные (—) и вычисленные (---) формы напряжения на выходе структуры 4

На воздействие СШП импульса со спектром от 0,1 до 6 ГГц из стандарта МЭК (рисунок 4.12) вычислен временной отклик (методом 2 и электродинамическим моделированием) на выходе структуры 4 (рисунок 4.13). Видно, что U_{\max} при моделировании и измерениях не превышает 25,6 и 26,9 мВ соответственно и определяется импульсом перекрестной помехи в диапазоне 0,75–1,25 нс так, что ослабление составило 17,9 и 17 раз соответственно. Из S -параметров, вычисленных квазистатическим и электродинамическим подходами, вычислены временные отклики структур 5 и 6 (рисунок 4.14). Видно, что на выходе структуры 5 СШП-импульс раскладывается на три основных импульса:

перекрестную помеху ($И1$); нечетную ($И2$) и четную ($И3$) моды. U_{\max} определяется $И2$ и составляет 154 и 153,4 мВ при электродинамическом и квазистатическом моделировании соответственно (ослабление 2,97 и 2,98 раза соответственно). На выходе структуры 6 основные импульсы мод и отражения разной полярности, возникающие из-за сворачивания, накладываются и значительно компенсируют друг друга. U_{\max} на выходе структуры 3 составило 146,5 и 153,7 мВ при электродинамическом и квазистатическом моделировании соответственно (ослабление 3,12 и 2,98 раза соответственно).

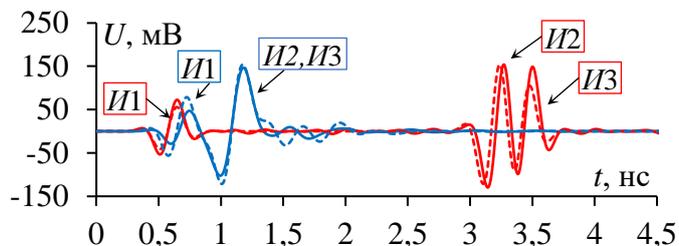


Рисунок 4.14 – Формы напряжения на выходе структур 5 (–) и 6 (—), вычисленные электродинамическим (–) и квазистатическим (—) подходами (аналогично для структуры 6 – 1,8 Гбит/с). Аналогично для структуры 5 она выбрана равной 100 Мбит/с, а структуры 6 – 1,8 Гбит/с.

Рассмотрена возможность использования исследуемых структур в сигнальных цепях, как в п. 4.1. Так как частота среза для структуры 4 составляет 510 МГц, можно выбрать соответствующую скорость передачи данных. Однако исходя из полученных значений ГВЗ для минимизации искажений полезного сигнала скорость выбрана равной 300 Мбит/с. Аналогично для структуры 5 она выбрана равной 100 Мбит/с, а структуры 6 – 1,8 Гбит/с.

На рисунке 4.15 представлены глазковые диаграммы структур 4, 5 и 6, где для структуры 4 добавлен BERContour, показывающий форму глаза, полученную с помощью моделирования. Глаз остается открытым, поэтому вероятность битовых ошибок низка.

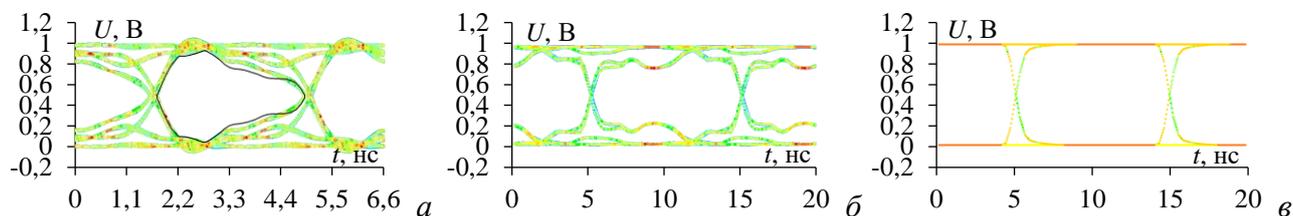


Рисунок 4.15 – Глазковые диаграммы структур 4 (при скорости 300 Мбит/с) (а), 5 (б) и 6 (в) (при скорости 100 Мбит/с)

Сравнительный анализ результатов на рисунке 4.15 показывает преимущество структуры 6. В отличие от структуры 5 с сужением глаза и перекрытием траекторий, указывающими на межсимвольную интерференцию, структура 6 обеспечивает лучшее качество сигнала с открытым глазом и минимальным разбросом траекторий на глазковой диаграмме. Кроме того, вычислены глазковые диаграммы структур 5 и 6 при скорости 1,8 Гбит/с (рисунок 4.16). Видно, что структура 6 обеспечит высокое качество сигнала и возможность работы на таких скоростях передачи данных, в отличие от структуры 5, где глаз практически полностью закрыт.

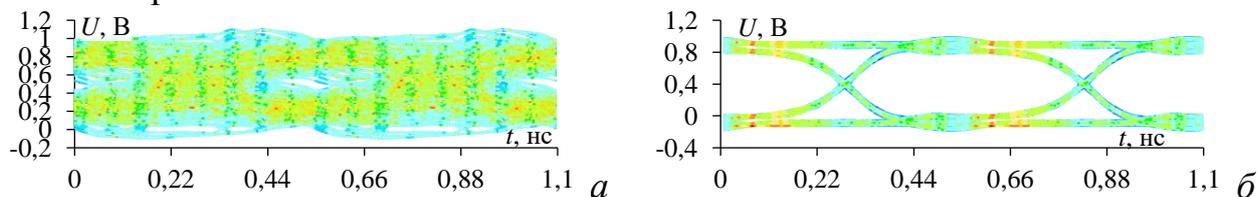


Рисунок 4.16 – Глазковые диаграммы структур 5 (а) и 6 (б), полученные с помощью моделирования при скорости 1,8 Гбит/с

В подразделе 4.4 сравнены структура 4 из п. 4.3 и 25 существующих фильтров, на основе расчета N -норм. Результаты показали, что предлагаемый фильтр превосходит известные по уменьшению большинства или всех N -норм, в зависимости от воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования

1. Проведена одно- и многокритериальная оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой МПЛ с использованием ГА. Сформулированы целевые функции: первая обеспечивала 50 Ом для среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод витка, а вторая – равенство интервалов между импульсами и минимизацию амплитуды. С этими функциями отработана оптимизация параметров витка.

2. Проанализировано влияние температуры в диапазоне от минус 50 до +150°C на характеристики витка меандровой МПЛ. Выявлено, что оно малое: отклонения не более 3,23% и 2,42% для погонных задержек четной и нечетной мод, 0,26% для амплитуды выходного напряжения и 3% для среднего геометрического волнового сопротивления. Выявлено, что выбором параметров линии можно уменьшить влияние температуры на её характеристики.

3. Оптимизированы параметры витка меандровой МПЛ с использованием ГА и ЭС для температур минус 50, +25 и +150°C, обеспечивающие равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод витка 50 Ом и минимальную амплитуду выходного напряжения. ЭС оказались быстрее ГА в 7 раз при схожих параметрах. Отработанный алгоритм оптимизации витка меандровой МПЛ может быть легко усовершенствован для поиска параметров, при которых температура минимально влияет на характеристики витка.

4. Анализ влияния воды и льда на характеристики витка выявил, что задержки импульсов четной и нечетной мод увеличились на 55% и 18% для льда и на 511% и 173% для воды.

5. Оптимизированы параметры витка со слоем воды и льда с помощью ГА и ЭС. При этом ЭС оказались в 3,3 раза быстрее, что подтверждает эффективность метода.

6. Введение двух пассивных проводников к витку меандровой МПЛ позволяет разложение СКИ на большее количество импульсов и рост его ослабления в сравнении с линией без пассивных проводников. Так, ослабление СКИ в такой структуре при оптимальных параметрах составило 10,6 раза, что в 3,42 раза больше, чем в структуре без пассивных проводников.

7. Сворачивание в примере с меандровой МПЛ уменьшило площадь в 2,31 раза. Уменьшение расстояния между неосновными полувитками усилило отражения из-за сворачивания, увеличив ослабление СКИ длительностью до 300 пс: в свернутом витке – 5,6 раза (в 1,8 раза больше, чем в обычном), в свернутом витке с двумя пассивными проводниками – 17,6 раза (в 5,68 раза больше, чем в обычном).

8. Экспериментально подтверждено значительное ослабление узкополосной (20,4 раза) и СШП (17 раз) помех в свернутом витке с двумя заземленными проводниками и покрытием из радиопоглощающего материала. Кроме того, структура усовершенствована так, что ее площадь уменьшилась в 6,7 раза относительно исходной (витка меандровой МПЛ), а полоса пропускания увеличилась в 5,88 раза при неизменном уровне ослабления СШП помехи.

9. Выполнен сравнительный анализ структуры 4 с 25 известными фильтрами. Выявлено, что она превосходит их по уменьшению большинства или всех N -норм. При воздействии СШП помехи $N1-N5$ ослабляются в 17,1, 18,7, 1,1, 3 и 9,5 раза соответственно, а узкополосной помехи – 18,3, 22,3, 1,1, 8,9 и 12,1 раза соответственно.

Рекомендации

1. Результаты могут применяться для совершенствования устройств защиты РЭС на основе МЛ от импульсных СШП воздействий.

2. Результаты могут использоваться для дальнейших исследований и проработки методик проектирования полосковых устройств, основанных на модальном разложении, с учетом реальных условий эксплуатации.

3. Результаты анализа распространения помеховых воздействий разной формы в полосковых устройствах на основе витка МЛ могут быть использованы в образовательном процессе высших учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Разработка многослойной меандровой линии для защиты от СКИ и других типов помех, например от электростатического разряда.

2. Исследование соотношения электрической прочности и конечных размеров разработанных устройств при воздействии СШП воздействий высокой мощности.

3. Проектирование и исследование полосковых устройств на основе витка МЛ в виде свернутой гибкой печатной платы для защиты реальных элементов и устройств РЭС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. **Малыгин К.П.** Анализ и параметрическая оптимизация эволюционными методами витка меандровой микрополосковой линии с учетом температуры / К.П. Малыгин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 3.

2. **Малыгин К.П.** Ослабление сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии с двумя пассивными проводниками / К.П. Малыгин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 7.

3. Ким Г.Ю. Гибридный способ защиты от сверхкоротких импульсов на основе меандровой линии и газоразрядного устройства / Г.Ю. Ким, **К.П. Малыгин**, В.Ю. Конев [и др.] // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 149-172.

Статьи в журналах, входящих в Q1/Q2 Scopus

4. **Malygin K.P.** Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines / **K.P. Malygin**, A.V. Nosov // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – Vol. 66. – No. 2 – April 2024. – pp. 599–605.
5. Zhechev Y.S. New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber / Y.S. Zhechev, A.H. Adnan, **K.P. Malygin** // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 86663–86670.

Публикации в журналах, индексируемых WoS и Scopus

6. **Malygin K.P.**, Nosov A.V., Kim G.Y. Attenuation of an ultrashort pulse in a folded meander microstrip line with two passive conductors // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. – 2024. – P. 1–17.
7. **Malygin K.P.**, Nosov A.V. Effect of the distance between the non-core turns of a meander microstrip line on the attenuation of the interfering ultrashort pulse and signal integrity // *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. – 2023. – Vol. 12. – No. 3. – P. 45-54.
8. **Malygin K.P.** Ultrashort pulse decomposition in a turn of a meander microstrip line with two passive conductors / **K.P. Malygin**, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // *Microwave Review*. – 2022. – Vol. 28. – No 2. – P. 28–32.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

9. **Malygin K.P.** Analysis and optimization of a turn of a meander line with broad-side coupling with temperature effect consideration / **K.P. Malygin**, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // *Proc. of 2022 Int. Ural conference on electrical power engineering (UralCon)*. – Magnitogorsk, Sept. 23–25, 2022. – P. 273–278.
10. **Malygin K.P.** Analysis and parametric optimization of a turn of a meander line with broad-side coupling in different environments / **K.P. Malygin**, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // *Proc. of III Int. scientific conf. «Advances in science, engineering and digital education» (ASEDU-III-2022)*. – Krasnoyarsk, Russia, December 8–10, 2022. – P. 1–5.
11. **Malygin K.P.** Multicriteria optimization of a meander line with broad-side coupling by genetic algorithms / **K.P. Malygin**, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.T. Gazizov, I.Y. Sagiyeva // *Journal of physics: conference series (JPCS)*. – 2020. – Vol. 1679, P. 1–5.
12. **Malygin K.P.** Analysis and parametric optimization of a turn of a meander microstrip line in various environments / **K.P. Malygin**, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // *Proc. of the 2023 Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM-2023)*. – Sochi, Russia, May 15–19, 2023. – P. 294–299.

Доклады в трудах отечественных конференций

13. **Малыгин К.П.** Однокритериальная оптимизация защитных меандровых линий генетическим алгоритмом / **К.П. Малыгин**, А.В. Козин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // *Материалы докладов Международной науч.-практич. конф. «Электронные средства и системы управления»*. – Томск, 28–30 ноября 2018. – Ч.1. – С. 298–302.
14. **Малыгин К.П.** Формулировка многокритериальной целевой функции по критериям разложения сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии из двух витков / **К.П. Малыгин**, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // 25-я

Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-25-2019)». – Томск. – 2019. – С. 158–161.

15. **Малыгин К.П.** Оптимизация витка меандровой линии по критериям равенства интервалов времени между импульсами разложения и минимизации амплитуды на выходе линии / **К.П. Малыгин**, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Материалы докладов Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 20–22 ноября 2019. – Ч. 2. – С. 42–45.

16. Царегородцев Н.А. Распространение затухающей синусоиды в витке меандровой линии с воздушным заполнением / Н.А. Царегородцев, **К.П. Малыгин**, Р.С. Суровцев // Материалы докладов Межд. научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 20–22 ноября 2021. – Ч.2 – С. 65–68.

Патенты

17. Патент на изобретение №2769104 Российская Федерация. Меандровая микрополосковая линия с двумя пассивными проводниками, защищающая от сверхкоротких импульсов / **Малыгин К.П.**, Носов А.В., Суровцев Р.С. – Заявка №2021117865; заявлен 21.06.2021; опубликован 28.03.2022, Бюл. №10.

18. Патент на изобретение №2772792 Российская Федерация. Усовершенствованная меандровая микрополосковая линия с двумя пассивными проводниками, защищающая от сверхкоротких импульсов / **Малыгин К.П.**, Носов А.В., Суровцев Р.С. – Заявка №2021117877; заявлен 21.06.2021; опубликован 25.05.2022, Бюл. №15.

19. Патент на изобретение №2827132 Российская Федерация. Свернутая меандровая микрополосковая линия с двумя пассивными проводниками, защищающая от сверхкоротких импульсов / **Малыгин К.П.**, Носов А.В., Ким Г.Ю. – Заявка №2024103003; заявлен 07.02.2023; опубликован 23.09.2024, Бюл. №27.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020665690. Оптимизация меандровой микрополосковой линии из двух витков, соединенных каскадно, с использованием эволюционных методов. Авторы: Ким Г.Ю., **Малыгин К.П.**, Носов А.В., Суровцев Р.С., Газизов Т.Т. Заявка №2020664825. Дата поступления 25 ноября 2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 ноября 2020 г.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024668496. Распространение сверхкороткого импульса в свернутом витке меандровой микрополосковой линии. Авторы: **К.П. Малыгин**, А.В. Носов. Заявка № 2024667263. Дата поступления 23 июля 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07 августа 2024 г.