

На правах рукописи



Носов Александр Вячеславович

Совершенствование защиты радиоэлектронной аппаратуры
от сверхкоротких импульсов за счет меандровых линий задержки

05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

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, старший научный
сотрудник, ТУСУР, главный научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории
«Безопасность и электромагнитная совместимость
радиоэлектронных средств»

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

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

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

Защита состоится 4 декабря 2018 года в 9 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/2jlpink1>

Автореферат разослан ____ октября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С каждым годом неуклонно растет плотность монтажа печатных плат (ПП), уменьшаются рабочие напряжения интегральных схем, увеличивается верхняя граничная частота спектра используемых сигналов. Это приводит к повышению восприимчивости радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к различным воздействиям и заставляет разработчика уделять особое внимание электромагнитной совместимости (ЭМС). Несоблюдение требований ЭМС может привести к сбою РЭА и повлечь финансовые потери и подрыв репутации предприятия-разработчика. Значительный вклад в исследование вопросов ЭМС печатных узлов и стойкости полупроводниковых компонентов к воздействию электростатических разрядов (ЭСР), разработки схем и методов защиты от электромагнитных воздействий, функциональной безопасности бортовых систем внесли Б.Б. Акбашев, Н.В. Балюк, А.М. Бобрешов, Р.М. Гизатуллин, Л.Н. Кечиев, В.Ю. Кириллов, С.Ф. Чермошенцев.

Одной из актуальных задач ЭМС является защита РЭА от импульсов наносекундного диапазона, поскольку они способны выводить цепи из строя при проникновении внутрь РЭА. Это обусловлено тем, что традиционные устройства защиты в силу своих недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие и наличие паразитных параметров) малоэффективны для защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ). Поэтому для защиты от воздействий в широком диапазоне требуются сложные и многоступенчатые устройства, что ведет к увеличению не только массы и габаритов устройства, но и финансовых затрат на проектирование и производство. А практика, наоборот, требует простоты и дешевизны устройств защиты. Поэтому актуален поиск новых устройств защиты и путей их построения. Примечательны для защиты РЭА от СКИ широко распространенные элементы современных ПП – меандровые линии задержки. Основным их достоинством является простота, не требующая введения в РЭА сложных многоступенчатых устройств. Действительно, традиционным назначением меандровых линий является задержка сигнала, когда ее невозможно обеспечить проведением обычных линий передачи из-за высокой плотности монтажа на ПП. Помимо традиционного назначения, известно использование меандровых линий для фильтрации сигнала в полосе частот, а также всепропускающих свойств витка меандра. Значительный вклад в исследования меандровых линий внесли В. Archambeault, А. Kabiri, О. Ramahi, R.B. Wu, Б.А. Беляев, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов и др. Однако не уделено должного внимания исследованию возможности использования меандровых линий для защиты от опасных сигналов (в частности от СКИ), которое начали Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий и А.Т. Газизов. Между тем дополнительные исследования (для разных структур, типов линий и воздействий, а также универсальных аналитических условий) позволят без введения новых устройств и компонентов в печатные узлы усовершенствовать их защиту от СКИ.

Цель работы – усовершенствовать защиту радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов за счет меандровых линий задержки.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать возможность защиты РЭА от СКИ и ЭСР с помощью меандровой линии с различными типами связи и в различном диэлектрическом заполнении.

2. Сформулировать условия, обеспечивающие разложение СКИ на последовательность импульсов в одном и двух витках меандровой линии.

3. Выполнить экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ за счет его разложения в витке меандровой линии с различными типами связи.

Научная новизна

1. Предложено использование меандровых линий из одного и двух витков с различными типами связи для защиты от сверхкороткого импульса за счет его разложения на последовательность импульсов меньшей амплитуды.

2. Сформулировано условие максимизации длительности сверхкороткого импульса, полностью разлагаемого в витке меандровой микрополосковой линии.

3. Исследована частотная зависимость модуля коэффициента передачи помехозащитных витков меандровой линии с различными типами связи.

4. Исследовано влияние потерь в проводниках и диэлектрике на формы импульсов разложения сверхкороткого импульса в витке меандровой линии с различными типами связи.

5. Выявлены возможности уменьшения амплитуды напряжения на выходе витка меандровой микрополосковой линии при воздействии на его вход импульса электростатического разряда.

Теоретическая значимость

1. Сформулирован ряд условий, обеспечивающих разложение сверхкороткого импульса в витке меандровых линий на последовательность импульсов меньшей амплитуды.

2. Сформулировано условие, обеспечивающее увеличение длительности сверхкороткого импульса, который может быть разложен в витке меандровой линии на последовательность импульсов, до значения, равного удвоенному произведению минимальной из погонных задержек четной и нечетной мод на длину полувитка.

3. Сформулированы условия, обеспечивающие разложение пикового выброса электростатического разряда на последовательность импульсов меньшей амплитуды в витке меандровой линии.

4. Для линии из двух витков сформулирован ряд условий, обеспечивающих в первом витке разложение сверхкороткого импульса на последовательность из трех основных импульсов с равными задержками между импульсами, а во втором витке – разложение трех импульсов с выхода первого витка на последовательность из девяти импульсов.

5. Выявлено, что в меандровой микрополосковой линии потери в проводниках оказывают более существенное влияние на амплитуду и форму сверхкороткого импульса, чем потери в диэлектрике, а в линии с лицевой связью, наоборот.

Практическая значимость

1. Получено максимальное ослабление сверхкороткого импульса в витке меандровой линии: в воздушном диэлектрическом заполнении – 1,8 раза; микрополосковой – 6,3 раза; с лицевой связью – 4,6 раза.

2. Получено максимальное ослабление сверхкороткого импульса в меандровой линии из двух витков: в воздушном диэлектрическом заполнении – 1,94 раза; микрополосковой – 5,2 раза; с лицевой связью – 4,8 раза.

3. Продемонстрировано ослабление в 4,6 раза пикового выброса ЭСР в витке меандровой микрополосковой линии.

4. Оработана методология оптимизации генетическими алгоритмами на тестовом примере одновременной оптимизации всех параметров меандровой линии в воздушном диэлектрическом заполнении и комбинации из нескольких параметров меандровой микрополосковой линии с боковой и лицевой связями.

5. Получены 6 патентов на изобретение: на устройства, защищающие от сверхкоротких импульсов, на основе меандровых линий задержки.

6. Результаты использованы в учебном процессе двух университетов.

Использование результатов исследований

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», хоздоговор 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 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/К, 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», RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

8. НИР «Комплекс теоретических и экспериментальных исследований возможности разработки новой технологии защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов на основе простых печатных структур», грант РФФИ 18-37-00339, 2018–2020 гг.

9. 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. года.

10. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР.

Структура и объем диссертации. В состав входят введение, 3 главы, заключение, список литературы из 138 наименования, приложение из 20 с. Объём с приложением – 185 с., в т.ч. 79 рисунков и 20 таблиц.

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или при его участии. Часть результатов получена с соавторами публикаций. Обработка и интерпретация результатов выполнены автором лично.

Методология и методы исследования. В работе применены математическое моделирование методом моментов и модифицированным узловым методом, оптимизация генетическими алгоритмами и натурный эксперимент на базе анализатора цепей и комбинированного стробоскопического осциллографа.

Положения, выносимые на защиту

1. Виток меандровой линии может быть использован для разложения сверхкороткого импульса в целях помехозащиты на последовательность импульсов меньшей амплитуды: до 6,3 раза при боковой связи с полосой пропускания 1,1 ГГц и до 4,6 раза при лицевой связи с полосой пропускания 0,715 ГГц, при подложке из стеклотекстолита и длительности импульса 40 пс (по уровню 0,5).

2. Равенство значения максимальной из погонных задержек четной и нечетной мод витка меандровой линии удвоенной минимальной задержке увеличивает длительность разлагаемого в этой линии импульса до значения, равного произведению минимальной из погонных задержек и длины линии.

3. Уменьшение амплитуды напряжения на выходе витка меандровой микрополосковой линии при воздействии на его вход импульса электростатического разряда возможно за счет разложения его пикового выброса на импульсы меньшей амплитуды.

Достоверность результатов основана на корректном использовании метода моментов и теории линий передачи, а также на согласованности результатов:

моделирования и натурального эксперимента; квазистатического и электродинамического подходов.

Апробация результатов

Результаты работы автора позволили подготовить заявки и победить в следующих конкурсах: ФЦП ИР (проект №RFMEFI57417X0172); грантов РФФИ (проект 18-37-00339); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2017 г.; на назначение стипендии Президента РФ студентам и аспирантам по приоритетным направлениям в 2016 и 2017 гг., 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: Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 2015 и 2016 гг.; Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Эрлагол (Алтай), 2015, 2016 и 2017 гг.; X Int. IEEE Scientific and Technical Conf. «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Омск, 2016 и 2017 гг.; Межд. науч.-метод. конф. «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов», Томск, 2016 г.; Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», Томск, 2017 и 2018 гг.; 2017 Int. Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Новосибирск, 2017 г.; Науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 2018 г.

Публикации. Результаты опубликованы в 28 работах (3 без соавторов):

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	3
Статья в журналах, индексируемых в WoS и SCOPUS	2
Статья в трудах конференций, индексируемых в WoS и SCOPUS	7
Доклад в трудах отечественных конференций	7
Патент на изобретение	6
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	3
ИТОГО:	28

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В гл. 1 выполнен обзор исследований по защите РЭА от СКИ. В гл. 2 рассмотрены устройства защиты от СКИ на основе меандровых линий. В гл. 3 описано экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ. В заключении перечислены основные результаты. Далее приведены списки сокращений и литературы, а в приложении – копии актов внедрения, патентов, свидетельств и дипломов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ: ОБЗОР

В разделе 1.1 обоснована актуальность защиты РЭА от СКИ. В разделе 1.2 выполнен обзор подходов к моделированию и выделен метод моментов для анализа межсоединений ПП. В разделе 1.3 выполнен обзор устройств и

решений для защиты от СКИ: рассмотрены традиционные устройства защиты, модальная фильтрация, а также применения меандровых линий задержки. В разделе 1.4 сформулированы цель и задачи работы.

2. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ МЕАНДРОВЫХ ЛИНИЙ

В разделе 2.1 выполнен детальный анализ искажений СКИ в витке меандровой линии в воздухе. Получено условие, обеспечивающее разложение СКИ на последовательность импульсов:

$$2\tau l \geq t_r + t_d + t_f, \quad (2.1)$$

где $\tau = \tau_e = \tau_o$, l – длина полувитка, а t_r , t_d , t_f – время нарастания, плоской вершины и спада СКИ соответственно. Поперечное сечение и схема соединений исследуемой линии представлены на рисунке 2.1.

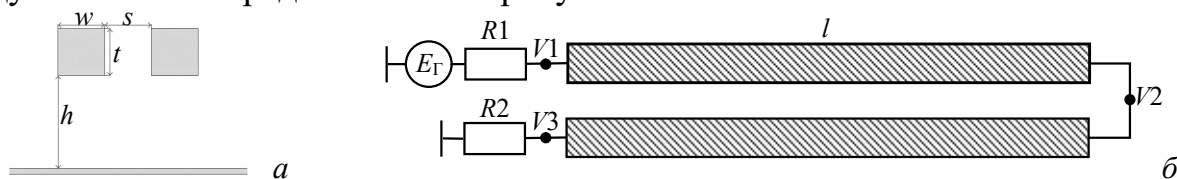


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение меандровой линии в воздухе (а), схема соединений (б)

Значения $R1$ и $R2$ для минимизации отражения сигнала на концах проводников линии приняты равными среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии. При моделировании использовался импульс в виде трапеции с амплитудой э.д.с. 1 В, $t_d = 100$ пс, а $t_r = t_f = 50$ пс. После оптимизации значений l и расстояния между проводниками (s) получено максимальное ослабление СКИ на ее выходе 1,6 раза. Показано что, в витке меандровой линии с сильной связью между полувитками, СКИ может раскладываться на последовательность импульсов с уровнем, не превышающим 60 % от уровня сигнала в начале витка. Для этого необходимо выполнение (2.1).

Проведена оценка влияния потерь на амплитуду и форму СКИ. Выявлено, что потери в проводниках сильно влияют на форму и амплитуду второго импульса. Так как потери в проводниках оказывают более существенное влияние на СКИ с меньшей длительностью плоской вершины, она уменьшена до 10 пс, и вычислен отклик на это воздействие импульса. Максимальное ослабление СКИ – 1,78 раза. При учете потерь, амплитуда выходного сигнала при $t_d = 100$ пс уменьшилась на 4%, а при 10 пс – на 10%.

Исследовано влияние перемычки между проводниками на форму и амплитуду СКИ. Для этого перемычка моделировалась линией передачи длиной равной расстоянию между полувитками, а емкости неоднородностей оценивались по формуле емкости плоского конденсатора. Максимальное отклонение амплитуды сигнала на выходе линии при учете перемычки составило 1 мВ (0,32 % от амплитуды сигнала).

На тестовом примере одновременной оптимизации всех параметров меандровой линии в воздухе, целью которой является равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной (Z_e) и нечетной (Z_o) мод 50 Ом, отработана методология оптимизации.

Выполнен детальный анализ искажений СКИ в двухвитковой меандровой линии в воздухе. Оценено влияние длины второго витка на форму сигнала в конце меандровой линии. Для моделирования принята линия в воздухе, состоящая из двух одинаковых витков, соединенных каскадно (рисунок 2.2). В качестве воздействия выбран такой же импульс.

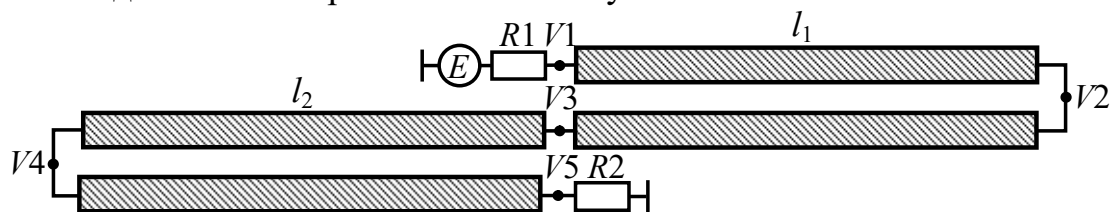


Рисунок 2.2 – Схема соединений двухвитковой линии

Поперечное сечение витков – как на рисунке 2.1а. Исходные параметры: ширина и толщина сигнального проводника $w=100$ мкм и $t=100$ мкм соответственно, расстояние между полувитками $s_1=s_2=100$ мкм, расстояние от схемной земли до проводников $h=200$ мкм.

Сначала выполнен детальный анализ изменения формы сигнала в двухвитковой меандровой линии, когда длина первого витка фиксирована ($l_1=30$ мм), а длина второго (l_2) изменяется от 1 до 60 мм с разным шагом. Сначала, для имитации измерительного тракта, значения $R1$ и $R2$ приняты равными по 50 Ом, а затем, для минимизации отражений сигнала – среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии $(Z_e Z_o)^{0,5}$. В результате, продемонстрировано появление искажений и их последовательное увеличение с ростом l_2 . Получено ослабление импульса на выходе линии при $R1=R2=50$ Ом 1,51 раза, при $R1=R2=(Z_e Z_o)^{0,5}$ – 1,31 раза. Затем выполнена оценка влияния расстояния между сигнальными проводниками второго витка на форму сигнала в конце линии. Выполнено моделирование при $s_1=100$ мкм и последовательном уменьшении s_2 от 100 до 10 мкм. Сопротивления $R1$ и $R2$ приняты равными $(Z_e Z_o)^{0,5}$. Найдено оптимальное значение $s_{2opt}=33$ мкм, при котором уровень сигнала на выходе линии минимален и не превышает 0,257 В. Наконец, проведена оценка влияния расстояния между проводниками первого и второго витков. Выполнено моделирование при одновременном уменьшении s_1 и s_2 от 100 до 10 мкм. Найдены $s_{1opt}=s_{2opt}=56,5$ мкм при которых уровень сигнала на выходе линии не превышает 0,3 В.

Таким образом, на примере двухвитковой меандровой линии в воздухе показана возможность защиты РЭА от СКИ, за счет его разложения на ряд импульсов. Выявлено, что минимизация максимальной амплитуды второго и третьего импульсов возможна при оптимизации расстояния между проводниками только второго витка. Получено максимальное ослабление уровня сигнала на выходе линии 1,94 раза.

В разделе 2.2 рассмотрена возможность защиты РЭА от СКИ за счет свойств витка меандровой МПЛ. Так как четная и нечетная моды будут иметь разные задержки, условие (2.1) примет вид

$$2\tau l \geq t_r + t_d + t_f, \quad (2.2)$$

где τ – наименьшее из значений погонных задержек четной и нечетной мод. Также введено дополнительное условие, позволяющее разложение основного сигнала на импульсы нечетной и четной мод меандровой МПЛ:

$$2l|\tau_e - \tau_o| \geq t_r + t_d + t_f. \quad (2.3)$$

Поперечное сечение линии представлено на рисунке 2.3а. Его параметры подобраны так, чтобы выполнялись условия (2.2) и (2.3). Схема соединений – как на рисунке 2.1б. Параметры источника и нагрузки при моделировании – как у линии в воздухе. Для выполнения условия (2.3) принято $l=45$ мм. Получено $s_{opt}=23$ мкм. Форма выходного напряжения при $l=45$ мм и $s=23$ мкм приведена на рисунке 2.3б. Видно, что воздействующий СКИ, в конце меандровой МПЛ, стал последовательностью из трех основных импульсов с равными амплитудами, не более 0,207 В (40% от уровня сигнала в начале линии).

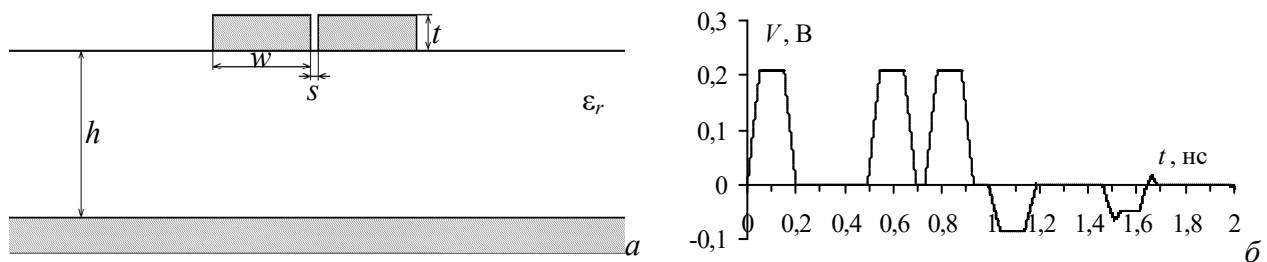


Рисунок 2.3 – Поперечное сечение меандровой МПЛ (а) и форма сигнала на ее выходе (б)

Влияние перемычки между проводниками на форму и амплитуду СКИ в витке меандровой МПЛ исследовано аналогично воздушной. Отклонение амплитуды сигнала на выходе линии при учете перемычки менее 0,97 %.

Проанализировано влияние потерь в проводниках и диэлектрике на форму сигнала СКИ в конце меандровой МПЛ. Выявлено, что потери в проводниках больше влияют на амплитуду и форму сигнала, чем потери в диэлектрике. Потери в проводнике больше уменьшают амплитуду импульса нечетной моды, а в диэлектрике – четной. Учет потерь в проводниках и диэлектрике сильно меняет формы и амплитуды только импульса нечетной моды, а импульсы наводки и четной моды меняются мало.

Примечательно, что за счет оптимизации параметров поперечного сечения меандровой МПЛ может быть получено оптимальное разложение СКИ: приход второго и третьего импульсов к концу линии сразу после импульса перекрестной наводки. Условие такого разложения

$$\tau_{max} = 2\tau_{min}. \quad (2.4)$$

Получены параметры, обеспечивающие условия (2.3) и (2.4), а также минимизацию амплитуды выходного напряжения: $w=850$ мкм, $t=452$ мкм, $s=46$ мкм, $h=540$ мкм, $\epsilon_r=40$, а $R1=R2=23$ Ом. Формы напряжения при воздействии импульсами с длительностями 200 и 500 пс приведены на рисунке 2.4.

Таким образом, оптимизация поперечного сечения по условию (2.4) обеспечивает приход трех импульсов к концу линии через равные интервалы времени, что максимизирует длительность ослабляемого импульса.

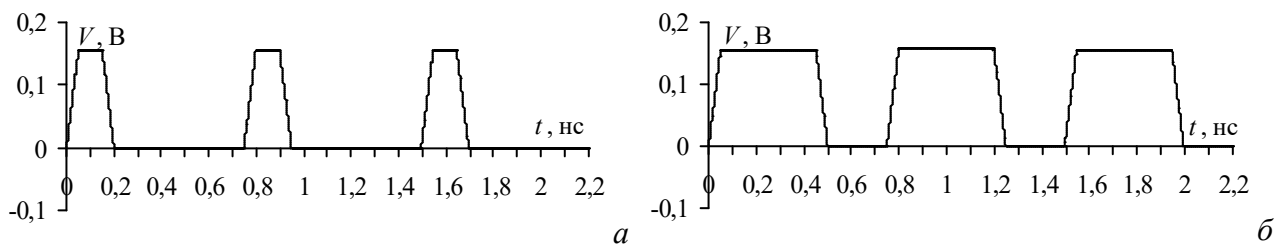


Рисунок 2.4 – Формы напряжения на выходе исследуемой линии при длительностях воздействующих импульсов 200 (а) и 500 пс (б)

С помощью ГА выполнена однокритериальная оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой МПЛ. Для этого сформулирована целевая функция, обеспечивающая $Z=(Z_e Z_o)^{0,5}=50$ Ом. Выявлено, что при увеличении числа поколений до 80 сходимость значений Z улучшается, а сходимость параметров w и s не наступает.

Затем моделировалась МПЛ из двух витков, соединенных каскадно. Схема соединений – как на рисунке 2.2, а поперечное сечение – как на рисунке 2.3а. Выявлено, что сначала в первом витке необходимо выполнить условие (2.4). Затем сформулирован ряд условий, обеспечивающий разложение каждого из импульсов (перекрестной наводки, нечетной и четной мод линии) с выхода первого витка во втором витке, а также позволяющий исключить наложение импульсов четной моды из каждой последовательности на импульс перекрестной наводки следующей последовательности. В результате выбора параметров линии, обеспечивающих условие (2.4) в первом витке и сформулированные условия во втором витке, на выходе меандровой МПЛ из двух витков получено ослабление СКИ 5,2 раза. Таким образом, выполнение условия (2.4) в первом витке и сформулированных условий во втором витке меандровой МПЛ дало ослабление СКИ на ее выходе 5,2 раза.

Рассмотрено разложение ЭСР в витке меандровой МПЛ (рисунок 2.1). Параметры сечения: $w=2450$ мкм, $t=45$ мкм, $s=300$ мкм, $h=2000$ мкм, $\epsilon_r=5,4$. Они дают $(Z_e Z_o)^{0,5} \approx 50$ Ом для минимизации отражений, а также соответствуют технологии двусторонних печатных плат. Линия состоит из двух параллельных проводников длиной l , соединенных между собой на одном конце (рисунок 2.5а). Один из них соединен с генератором воздействия (идеальный источник тока I с параллельным сопротивлением $R1$). Другой соединен с приёмным устройством (сопротивление $R2$). Воздействие – импульс ЭСР с формой тока, близкой к III степени жесткости ($\tau_1=1,3$ нс, $\tau_2=1,7$ нс, $\tau_3=6$ нс, $\tau_4=58$ нс, $I_1=21,51$ А, $I_2=10,1$ А, $n=3$) по стандарту IEC 61000-4-2. На рисунке 2.5б приведена форма напряжения в начале витка (узел V1) при $l=0,1$ м.

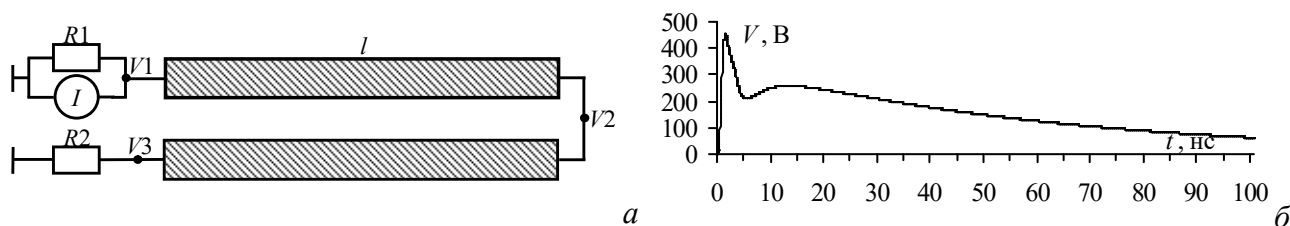


Рисунок 2.5 – Схема соединений меандровой МПЛ (а) и форма сигнала на входе витка (б)

Для полного разложения ЭСР надо, по (2.5), обеспечить $l=66$ м. Так как линия с такой длиной неприемлема для РЭА, рассмотрено разложение только пикового выброса ЭСР длительностью около 4 нс. Тогда для этого достаточно обеспечить $l_{opt}=2,63$ м. Для понимания изменения формы ЭСР выполнено детальное моделирование при росте l с 0,1 м до 10 м. Выявлено, что рост после l_{opt} мало уменьшает амплитуду ЭСР на выходе. На рисунке 2.6а представлены вычисленные формы выходного напряжения (в узле V3) при $l=0,1, 0,5, 2, 3,5$ м. Видно проявление импульса перекрестной наводки (первый импульс), а также рост задержки основного сигнала (пикового выброса ЭСР) по мере роста l . Стоит отметить незначительное (в 1,1 раза) увеличение амплитуды сигнала на выходе витка относительно входа (при $l=0,1$ м). Это обусловлено наложением пикового выброса, прошедшего по витку, на ближнюю перекрестную наводку от него же. При увеличении длины линии до 3,5 м яснее проявляются импульсы нечетной и четной мод. Как выявлено ранее, увеличение связи между проводниками приводит к увеличению амплитуды импульса перекрестной наводки и уменьшению амплитуды импульсов нечетной и четной мод (основного сигнала). Поэтому, для минимизации амплитуды ЭСР на выходе линии выполнено аналогичное моделирование с уменьшением значения s от 300 до 1 мкм. Формы напряжения на выходе линии при $s=250, 150, 50, 10, 1$ мкм представлены на рисунке 2.6б.

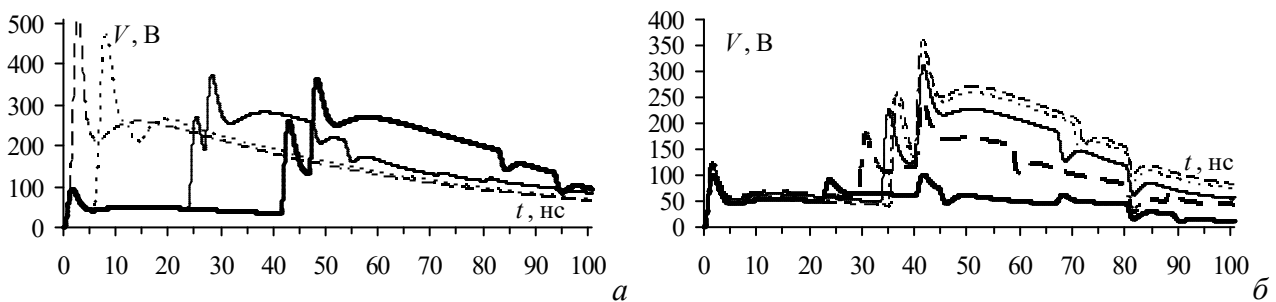


Рисунок 2.6 – Формы напряжения ЭСР на выходе меандровой МПЛ (а) при $l=0,1$ (---), $0,5$ (- -), 2 (—), $3,5$ (—) м и формы напряжения ЭСР на выходе меандровой МПЛ длиной $l=3$ м (б) при $s=250$ (---), 150 (- -), 50 (—), 10 (—), 1 (—) мкм

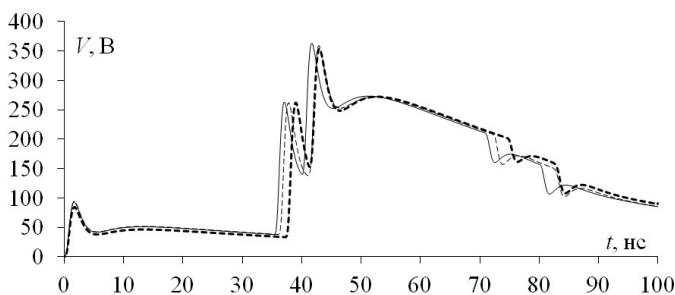


Рисунок 2.7 – Формы напряжения ЭСР на выходе меандровой МПЛ длиной $l=3$ м при $s=300$ мкм, полученные с помощью квазистатического подхода (—) и электродинамического подхода с грубой (- -) и уященной (- -) сетками

Для проверки достоверности полученных результатов выполнено моделирование с использованием двух подходов: квазистатического и электродинамического (рисунок 2.7, таблица 2.1). Видно, что формы напряжения ЭСР на выходе МПЛ, полученные с помощью этих подходов хорошо согласуются, а отличия уменьшаются с учащением сетки.

Таблица 2.1 – Амплитуды и задержки второго и третьего импульсов на выходе МПЛ, полученные с помощью электродинамического и квазистатического подходов

Подход	t_2 , нс	t_3 , нс	V_1 , В	V_2 , В	V_3 , В
Квазистатический	35,42	40,11	92,67	262,72	362,73
Электродинамический (с грубой сеткой)	37,16	41,32	84,12	262,19	354,15
Электродинамический (с учащенной сеткой)	35,96	41,05	94,01	261,64	358,82

Таким образом, показано изменение формы и амплитуды ЭСР в витке меандровой МПЛ с ростом ее длины. Минимизировался пиковый выброс ЭСР за счет его разложения на последовательность импульсов меньшей амплитуды. За счет выбора оптимальной длины линии ослабление ЭСР составило 1,38 раза, а за счет уменьшения расстояния между проводниками при оптимальной длине линии – 4,6 раза. Дополнительно выполнено моделирование с использованием электродинамического подхода и проведено их сравнение с результатами квазистатического подхода. Получена хорошая согласованность: отклонение по амплитуде 1,08%, а по задержкам до 2,32%.

В разделе 2.3 рассмотрена защита РЭА от СКИ за счет свойств витка меандровой линии с лицевой связью при $l=150$ мм. Ее схема соединений такая же, как на рисунке 2.1б, а поперечное сечение представлено на рисунке 2.8. Для

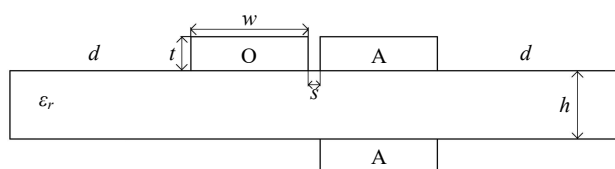


Рисунок 2.8 – Поперечное сечение меандровой линии с лицевой связью

разложения СКИ на ряд импульсов выполнены условия (2.2) и (2.3), а для минимизации амплитуды сигнала на выходе линии найдена оптимальная связь между проводниками (h). В результате получено ослабление СКИ в конце меандровой линии с лицевой связью 2,47 раза.

Дополнительно выполнен учет влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму СКИ в конце меандровой линии с лицевой связью. Выявлено, что потери в диэлектрике больше влияют на амплитуду и форму импульсного сигнала в конце меандровой линии с лицевой связью, чем потери в проводниках. Учет потерь приводит к существенному изменению формы и амплитуды импульсов четной и нечетной мод, тогда как импульс наводки меняется мало. Так, ослабление СКИ в конце линии составило 2,75 раза.

С помощью ГА выполнена однокритериальная оптимизация параметров поперечного сечения витка. Для этого сформулирована целевая функция, обеспечивающая равенство $(Z_c Z_o)^{0,5} = 50$ Ом. Выявлено, что с ростом числа поколений до 80 сходимости значений Z , w и h улучшаются: максимальные отклонения их значений составили 1,13%, 3,03% и 5,19% соответственно.

Затем моделировалась меандровая линия с лицевой связью из двух витков, соединенных каскадно. Схема соединений такая же, как на рисунке 2.2, а поперечное сечение – как на рисунке 2.8а. Аналогично разделу 2.2, сначала в первом витке выполнено условие (2.4). Затем, сформулирован новый ряд условий, обеспечивающий разложение каждого из импульсов (перекрестной наводки, нечетной и четной мод) с выхода первого витка во втором витке, а

также позволяющий исключить наложение импульсов четной моды из каждой последовательности на импульс перекрестной наводки следующей последовательности. В результате выбора параметров линии, обеспечивающих условие (2.4) в первом витке и сформулированные условия во втором витке, на выходе меандровой линии с лицевой связью из двух витков получено ослабление СКИ 4,8 раза.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

В разделе 3.1 выполнено экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ за счет его разложения в витке меандровой МПЛ на ряд импульсов меньшей амплитуды, а также исследован коэффициент передачи витков. Для изготовления печатной платы выбран типовой материал – двусторонне фольгированный стеклотекстолит марки FR-4, без паяльной маски. Толщина основы для печатной платы и толщина фольги выбранного материала: $h=2$ мм и $t=35$ мкм. Так как часть параметров поперечного сечения линии имеет типовые значения, то выполнялась оптимизация только w и s . После оптимизации принято $w=2500$ мкм и $s=250$ мкм. Для всех остальных макетов значение s уменьшалось до 100 мкм с шагом 50 мкм. Длина (l) каждого из полувитков по длине зазора составляет 90 мм, а перемычки между ними – $(2w+s)$. По результатам предварительной оптимизации изготовлена печатная плата с макетами меандровых линий задержки (рисунок 3.1а). Для натурального эксперимента с выхода генератора на вход осциллографа С9-11 подавался СКИ с длительностью 40 пс (по уровню 0,5 от 527 мВ). Осциллограмма напряжения на выходе генератора приведена на рисунке 3.1б.

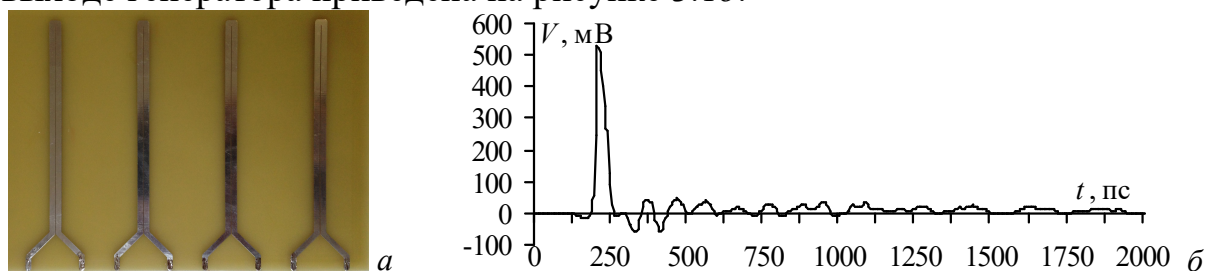


Рисунок 3.1 – ПП с макетами (а) и осциллограмма напряжения на выходе генератора (б)

Осциллограммы с выхода каждого из макетов приведены на рисунке 3.2. Видно, что сигнал в конце всех линий представлен тремя основными импульсами, где первый – перекрестная наводка на ближнем конце, а второй и третий – импульсы нечетной и четной мод. Полученные осциллограммы качественно подтверждают ожидаемые результаты. Результаты эксперимента сведены в таблицу 3.1, где V_1 , V_2 , V_3 – амплитуды первого, второго и третьего импульсов соответственно, $\Delta\tau_{21}=\tau_2-\tau_1$ – разность задержек второго и первого, а $\Delta\tau_{32}=\tau_3-\tau_2$ – третьего и второго (измерено по пикам импульсов). Максимальное ослабление амплитуды СКИ – 6,3 раза.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность разложения СКИ в витке меандровой МПЛ на последовательность импульсов. Максимальное ослабление амплитуды СКИ составило 6,3 раза.

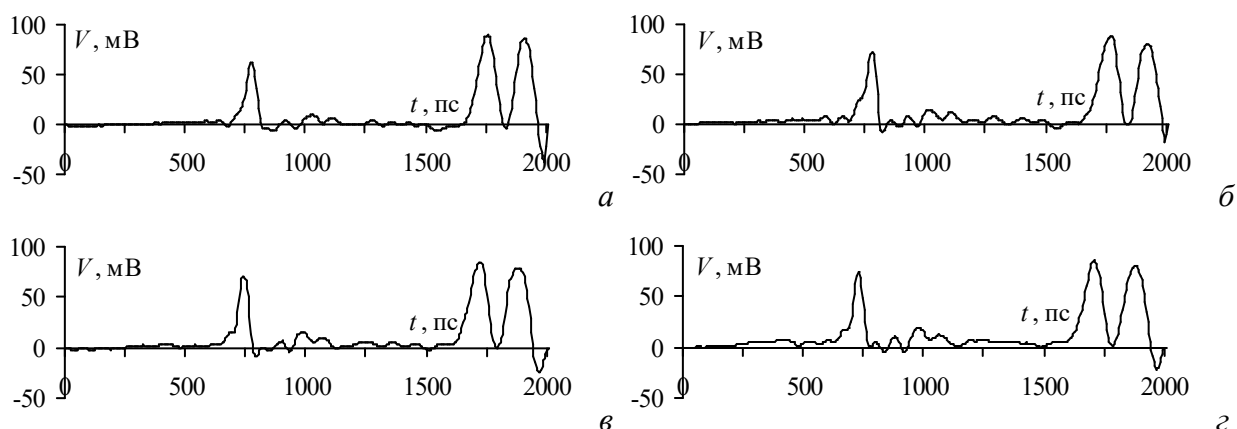


Рисунок 3.2 – Осциллограммы напряжения на выходе макетов меандровых МПЛ с $s=300$ (а), 250 (б), 200 (в), 150 (г) мкм

Таблица 3.1 – Экспериментальные зависимости амплитуд первых трех импульсов и разности задержек между их вершинами на выходе макетов меандровых линий от s

s , мкм	300	250	200	150
V_1 , мВ	67,1	71,1	74	79
V_2 , мВ	93,8	89,9	86	84
V_3 , мВ	87	83	81,5	81
$\Delta\tau_{21}$, пс	1016	1016	1012	1012
$\Delta\tau_{32}$, пс	160	160	164	172

Затем выполнено вычисление частотной зависимости $|S_{21}|$ с учетом реальных геометрических параметров макетов. Оценено влияние потерь на изменение $|S_{21}|$. Для этого выполнено моделирование без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектрике для частот от 10 МГц до 10 ГГц, при $R_1=R_2=50$ Ом. Без учета потерь коэффициенты матриц погонных сопротивлений $\mathbf{R}$ и проводимостей $\mathbf{G}$ приняты равными нулю. При учете потерь матрица $\mathbf{R}$ вычислялась с учетом скин-эффекта, но без учета эффекта близости и потерь в опорном проводнике, а для вычисления элементов матрицы $\mathbf{G}$ использована широко известная модель Джорджевича для частотной зависимости ϵ_r и $\text{tg}\delta$ материала FR-4. Измерена частотная зависимость $|S_{21}|$ каждого из макетов анализатором цепей P2M-40 для частот от 10 МГц до 10 ГГц. В таблицу 3.2 сведены полосы пропускания макетов по уровню минус 3 дБ при моделировании с учетом и без учета потерь.

Таблица 3.2 – Полоса пропускания (ГГц) витков меандровой МПЛ

s , мкм	Моделирование		Эксперимент
	без потерь	с потерями	
300	1,28	1,35	1,13
250	1,25	1,34	1,13
200	1,24	1,32	1,12
150	1,22	1,30	1,14

Результаты моделирования и эксперимента в частотной и временной областях позволяют утверждать, что виток меандровой МПЛ позволяет обеспечить защиту РЭА от СКИ за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды. При этом, полезные сигналы с верхней граничной частотой 1,1 ГГц будут проходить по витку линии с минимальными искажениями.

В разделе 3.2 описано экспериментальное подтверждение защиты РЭА от СКИ с помощью витка меандровой линии с лицевой связью. По результатам предварительной оптимизации, из двухстороннего стеклотекстолита марки FR-4 изготовлена печатная плата с набором макетов с $l=200, 150$ и 100 мм. Затем макеты были разделены (рисунок 3.3).

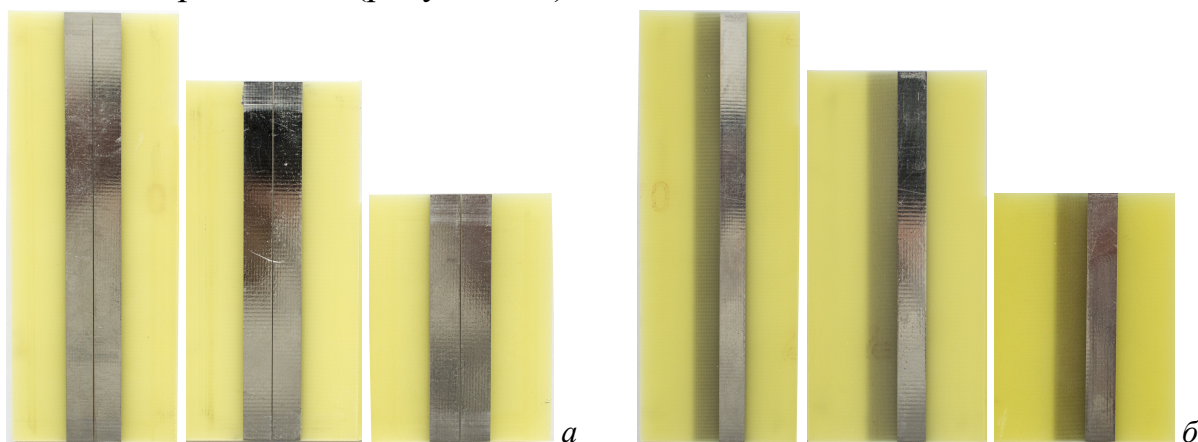


Рисунок 3.3 – Макеты меандровых линий с лицевой связью: вид сверху (а) и снизу (б)

Методика эксперимента аналогична методике из раздела 3.1. Однако амплитуда воздействующего импульса составляет $0,648$ В. В результате, получены осциллограммы сигнала из трех основных импульсов (перекрестной наводки, нечетной и четной мод). Выявлено, что с ростом длины линии растет время прихода второго и третьего импульсов (нечетной и четной мод). Максимальный уровень сигнала на выходе – 24% от уровня сигнала на входе.

Также исследована частотная зависимость $|S_{21}|$ макетов с учетом их реальных размеров аналогично разделу 3.2. Получены вычисленные (без учета и с учетом потерь) и измеренные полосы пропускания для каждого из витков по уровню минус 3 дБ (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Полоса пропускания (МГц) витков меандровой линии с лицевой связью

l , мм	Моделирование		Эксперимент
	<i>без потерь</i>	<i>с потерями</i>	
200	395	355	365
150	535	475	475
100	800	710	715

Результаты моделирования и эксперимента в частотной и временной областях позволяют утверждать, что виток меандровой линии с лицевой связью позволяет обеспечить защиту РЭА от СКИ за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды. При этом полезные сигналы с верхней граничной частотой $0,365\text{--}0,715$ ГГц для разных макетов будут проходить по витку линии с минимальными искажениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертации перечислены ее результаты, показавшие, что цель работы достигнута, а они имеют значение для технических наук в области исследования «Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств» по п. 9 паспорта специальности 05.12.04.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Суровцев Р.С. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Р.С. Суровцев, А.В. Носов, А.М. Заболоцкий // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 120–123.

2. Суровцев Р.С. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, А.В. Носов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2016. – № 3 (19). – С. 47–50.

3. Суровцев Р.С. Параметрическая оптимизация защитного витка меандровой линии с лицевой связью / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 280–286.

Публикации в журналах, индексируемых в WoS и Scopus

4. Surovtsev R.S. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Trans. on EMC. – Vol. 59, No. 6. – March 2017. – P. 1864–1871.

5. Nosov A.V. Investigation of possibility of protection against electrostatic discharge using meander microstrip line / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2018. Vol. 1015, № 2. – 6 p.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

6. Surovtsev R.S. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // 16th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – June 29 – July 3, 2015. – P. 175–177.

7. Surovtsev R.S. Influence of losses on ultrashort pulse decomposition in a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, T.T. Gazizov // 17th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – June 30 – July 4, 2016. – P. 151–154.

8. Surovtsev R.S. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line. X International IEEE Scientific and Technical Conference / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, Russian Federation, November 15–17, 2016. – P. 151–154.

9. Nosov A.V. Delay line protecting against ultrashort pulses with increased duration / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.T. Gazizov // 18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, June 29 – July 3 2017. – P. 119–122.

10. Parametric optimization of protective meander line turn in air filling by genetic algorithm / A.V. Nosov, T.T. Gazizov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // 2017

Int. Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Akademgorodok, Novosibirsk, Russia, September 18–22. – 2017. – P. 459–462.

11. Nosov A.V. Study of protective meander line turn with broad-side coupling / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // 2017 Int. Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Akademgorodok, Novosibirsk, Russia, September 18–22, 2017. – P. 453–458.

12. Surovtsev R.S. Transmission coefficient frequency dependence of protective meander line turn up to 10 GHz / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov // X Int. IEEE Scientific and Technical Conf. «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines». – Omsk, Russian Federation, November 14–16, 2017. – P. 1–4.

Доклады в трудах отечественных конференций

13. Носов А.В. Оценка влияния потерь на разложение сверхкороткого импульса в витке воздушной меандровой линии / А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Материалы докладов межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, РФ. – 2015. ч. 2. – С. 47–52.

14. Куксенко С.П. Новая постановка дисциплины «Теория ЭМС радиоэлектронных средств и систем» / С.П. Куксенко, А.О. Белоусов, А.В. Носов // Материалы межд. научно-метод. конф. «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов». – Томск, РФ, 28–29 января 2016. – С. 134–135.

15. Носов А.В. Анализ влияния параметров влагозащитного покрытия на уровень перекрестных наводок / А.В. Носов, В.А. Сирица, Р.С. Суровцев // Материалы межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2017», Томск, РФ, 10–12 мая 2017. – Ч.3 – С. 83–86.

16. Носов А.В. Влияние потерь на амплитуду и форму сверхкороткого импульса в витке меандровой линии с лицевой связью // Материалы межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, РФ, 16–18 мая 2018. – Ч. 3. – С. 248–252.

17. Носов А.В. Обзор устройств, выполненных по технологии LTCC / А.В. Носов, Р.Д. Абулев // Материалы межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018». – Томск, РФ, 16–18 мая 2018. – Ч. 2. – С. 202–204.

18. Носов А.В. Методы и подходы к моделированию меандровых линий задержки / А.В. Носов, Е.А. Сердюк // Материалы межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018». – Томск, РФ, 16–18 мая 2018. – Ч. 2. – С. 144–147.

Тезисы в трудах отечественных конференций

19. Носов А.В. Влияние перемычки между проводниками на форму и амплитуду сверхкороткого импульса в витке меандровой линии // Научно-техн. конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, РФ, 12–13 апреля 2018. – С. 92–94.

Патенты и свидетельства

20. Пат. на изобретение №2637484 РФ. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Т.Р. Газизов, Р.С. Суровцев, А.В. Носов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов. – Заявка №2016141521; заявлен 21.10.2016; опубликован 04.12.2017.

21. Пат. на изобретение №2600098 РФ. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка №2015137528/08(057416); заявлен 02.09.2015; опубликован 20.10.2016.

22. Пат. на изобретение №2607252 РФ. Меандровая микрополосковая линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка №2015129255/(045208); заявлен 16.07.2015; опубликован 10.01.2017.

23. Пат. на изобретение №2606776 РФ. Меандровая линия задержки из двух витков с разными разносами, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка №2015137524/(057411); заявлен 02.09.2015; опубликован 10.01.2017.

24. Пат. на изобретение №2637484 РФ. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Т.Р. Газизов, Р.С. Суровцев, А.В. Носов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов. – Заявка №2016141521; заявлен 21.10.2016; опубликован 04.12.2017.

25. Пат. на изобретение №2656834 РФ. Усовершенствованная линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Т.Р. Газизов, Р.С. Суровцев, А.В. Носов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов. – Заявка №2016141523; заявлен 21.10.2016; опубликован 06.06.2018.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662520. TALGAT 2016. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 27 чел. Заявка № 20166619296. Дата поступления 1 сентября 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2016 г.

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

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618365. Распространение электростатического разряда по витку меандровой микрополосковой линии. Автор: А.В. Носов. Заявка № 2018615233. Дата поступления 23 мая 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.07.2018 г.