

На правах рукописи



Скорняков Иван

**Совершенствование полосковых устройств на основе
витка меандровой линии для защиты
от импульсных воздействий**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

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

Научный руководитель – **Суровцев Роман Сергеевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры телевидения и управления ТУСУР

Официальные оппоненты – **Горбачёв Анатолий Петрович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»;

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

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Защита состоится 17 ноября 2026 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/c64qtpi9>

Автореферат разослан ____ сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор технических наук, доцент

Суровцев Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Достижения в области радиотехники, электроники и инфокоммуникационных технологий сделали радиоэлектронные средства (РЭС) неотъемлемой частью многих сфер деятельности человека. Развитие РЭС и рост частот передачи сигналов сделали необходимой борьбу с электромагнитными помехами. Рост быстродействия и уменьшение размеров устройств, а также широкое применение микропроцессоров в РЭС снизили порог восприимчивости РЭС к электромагнитным помехам. Это привело к появлению угрозы преднамеренного электромагнитного воздействия (ПдЭМВ) на РЭС для нарушения её нормального функционирования. Среди них опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ), чей частотный диапазон достигает 10 ГГц, а длительность составляет несколько наносекунд. К классическим решениям защиты РЭС относят электромагнитные экраны, фильтры, ограничительные устройства. Одним из новых применений полосковых устройств является ослабление СКИ за счёт его разложения на составляющие, уровень которых менее опасен для РЭС. Это названо модальной фильтрацией, а устройства на её основе – модальными фильтрами (МФ). Кроме МФ схожими свойствами обладают устройства на основе витка меандровой линии (МЛ). Их недостаток – большие габариты при довольно низком ослаблении СКИ. Поэтому актуально их совершенствование.

Степень разработанности темы. Известными зарубежными учеными, посвятившими свои работы защите от ЭМВ, являются М. Backstrom, F. Brauer, F. Rachidi, W. Radasky, F. Sabath и др. Среди отечественных ученых, которые занимаются вопросами влияния ЭМВ на вычислительную технику, известны З.М. Гизатуллин, Р. Киричек, С.Ф. Чермошенцев и др. Значительный вклад в исследование стойкости электронных систем к помехам внесли Л.Н. Кечиев, В.Ю. Кириллов, Л.О. Мырова и др. Среди зарубежных ученых разработку частотно-селективных устройств защиты вели М. Camp, R. Krzikalla, T. Weber и др., а отечественных – Б.А. Беляев, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов, А.Н. Сычев и др. Исследование МФ в ТУСУРе ведёт научная школа Т.Р. Газизова. МФ на основе многопроводных линий исследуют А.О. Белоусов, Е. Жечев, А.М. Заболоцкий и Е.Б. Черникова. Ослабление СКИ в устройствах на основе витка МЛ исследуют С. Карри, З.М. Кенжегулова, А.В. Носов и Р.С. Суровцев. Несмотря на широту исследований этих устройств, актуально их совершенствование.

Цель работы – усовершенствовать характеристики полосковых устройств на основе витка меандровой линии для защиты от кондуктивных импульсных воздействий. Для её достижения нужно решить следующие **задачи**: оценить эффективность способов уменьшения перекрестных связей в связанных линиях; оценить влияние дополнительных заземленных проводников на модальное разложение в витке меандровой линии; усовершенствовать характеристики полосковых устройств на основе витка меандровой линии.

Научная новизна

1. Предложен виток линии с лицевой связью и трассировкой в форме меандра, отличающийся наличием дополнительного опорного проводника в поперечном сечении витка.

2. Предложен виток микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением, отличающийся трассировкой в форме спирали.

3. Предложен виток микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением, отличающийся трассировкой в форме меандра или спирали, добавлением дополнительных опорных проводников между полувитками и нанесением радиопоглощающего материала на поверхность витка.

Теоретическая значимость

1. Изучены особенности влияния оптимальных параметров покрывающего диэлектрика и дополнительного опорного проводника на коэффициенты связи в связанной микрополосковой линии.

2. Изучено влияние числа и расположения дополнительных опорных проводников в связанной линии с боковой и лицевой связью на эффективность модального разложения импульсных воздействий.

3. Исследовано влияние трассировки витка микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением на ослабление импульсных воздействий.

4. Исследовано влияние покрытия из радиопоглощающего материала витка микрополосковой меандровой линии на ослабление импульсных воздействий.

Практическая значимость

1. Разработаны методики квазистатического моделирования связанных линий, параметрической оптимизации и проектирования полосковых устройств на основе витка меандровой линии для защиты от импульсных воздействий.

2. Созданы прототипы 20 полосковых устройств защиты на основе витка меандровой линии, обеспечивающие разложение импульсных воздействий.

3. Экспериментально доказано, что добавление заземленных проводников в структуру витка МЛ с боковой связью и трассировкой в форме меандра даёт рост ослабления импульсного и гармонического воздействий в 1,25 и 1,5 раза соответственно.

4. Экспериментально доказано, что дополнительный опорный проводник в витке МЛ с лицевой связью увеличивает ослабление импульсного воздействия на его выходе в 1,5 раза за счёт роста уровня комбинационной составляющей и уменьшения уровня основных составляющих отклика.

5. Доказана эффективность усовершенствованных прототипов на основе витка меандровой линии для ослабления воздействий реальных генераторов преднамеренных электромагнитных воздействий.

6. Результаты использованы в АО «НПЦ «Полюс», НИР по грантам РФФИ и учебном процессе ТУСУРа (три акта внедрения).

Положения, выносимые на защиту

1. Введение дополнительного опорного проводника в поперечное сечение витка линии с лицевой связью, при трассировке в форме меандра на той же площади платы, способно увеличить ослабление импульсного воздействия длительностью 900 пс в 1,5 раза и расширить полосу пропускания витка в 1,8 раза.

2. Трассировка в форме спирали витка микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением, по сравнению с трассировкой в форме меандра, при одинаковой длине печатного проводника и включении в тракт 50 Ом, спо-

способна увеличить ослабление импульсного воздействия длительностью 300 пс в 1,6 раза.

3. Модификация витка микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением, за счёт трассировки в форме меандра, добавления опорных проводников между его полувитками и нанесения радиопоглощающего материала на поверхность витка, способна увеличить ослабление импульсного воздействия длительностью 300 пс в 3,3 раза.

Методология и методы исследования. Использованы численное моделирование методами моментов и конечных разностей во временной области, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и эволюционными алгоритмами, лабораторный эксперимент и метод валидации выделением особенностей для оценки согласованности результатов моделирования и измерений.

Достоверность результатов основана на корректном применении теории линий передачи, согласованности результатов, полученных при моделировании квазистатическим и электродинамическим подходами, с результатами измерений, выполненных на базе сертифицированных измерительных комплексов, а также валидации результатов стандартизированным методом.

Использование результатов (3 акта о внедрении)

1. Проект «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости», государственное задание FEWM-2020-0041, 2019–2023 гг.

2. Проект «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях», проект FEWM-2022-0001, 2022–2024 гг.

3. Проект «Исследование методов и технологий создания информационно-телекоммуникационных систем радиомониторинга и связи, их компонентов и узлов, на основе численных и экспериментальных методов анализа электромагнитных сигналов и физических явлений в твердом теле», проект FEWM-2026-0007 2026–2028 гг.

4. Приоритет-2030. Программа развития Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) на 2021-2030 в рамках программы стратегического академического лидерства, 2021 г.

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

6. НИР «Создание методики проектирования компактных полосковых устройств защиты от импульсных сверхширокополосных воздействий на основе витка меандровой линии», грант РНФ № 24-79-00159, 2024–2026 гг.

7. Учебный процесс кафедры телевидения и управления института радиоэлектронной техники ТУСУРа (уровень бакалавриата).

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Постановка цели работы, формулировка задач исследования, обработка и интерпретация результатов выполнены с научным руководителем. Часть результатов по экспериментальному исследованию прототипов полосковых устройств на основе витка МЛ получена совместно с *Карри С.Х.* и *Миколой П.В.*

Апробация результатов. Результаты позволили подготовить заявки, победившие в 3 конкурсах грантов: РФФИ и двух грантов РНФ. Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2020, 2021, 2022 гг.; Межд. научн-практич. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2025 г.; Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing, г. Сочи, 2025 г.; Int. conf. on actual problems of electronic instrument engineering, г. Новосибирск, 2025 г.

Публикации. Результаты работы опубликованы в 13 работах (3 без соавторов): 5 статей в журналах из перечня ВАК (4 по специальности 2.2.13 и 1 по смежной отрасли науки); 3 доклада в трудах конференций, индексируемых в Scopus; 4 доклада в трудах других конференций; 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список использованной литературы из 247 наименований, 2 приложения. Объём диссертации – 182 с., в т.ч. 126 рисунков и 41 таблица.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обеспечение защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных воздействий: обзор

В подразделе 1.1 обоснована актуальность обеспечения защиты РЭС от кондуктивных ЭМВ. **В подразделе 1.2** приведены источники и классификация ЭМВ. **В подразделе 1.3** приведены решения для защиты РЭС от ЭМВ и выделены полосковые устройства на основе модального разложения. **В подразделе 1.4** приведены способы уменьшения перекрестных связей в связанных линиях. **В подразделе 1.5** приведены методы анализа полосковых устройств и оценки их эффективности для защиты от ЭМВ. **В подразделе 1.6** сформулированы цель и задачи работы.

2. Оценка эффективности способов уменьшения перекрестных связей в связанных линиях

В подразделе 2.1 приведена методика моделирования связанных линий в системе TUSUR.EMC, которая применена на всех этапах работы при предварительных оценках. **В подразделе 2.2** оценено влияние диэлектрического покрытия платы на уровень перекрестных помех, а **в подразделе 2.3** – дополнительного заземленного проводника. **В подразделе 2.4** сравнены их результаты.

3. Влияние дополнительных опорных проводников на эффективность модального разложения

В подразделе 3.1 предложена методика параметрической оптимизации витка МЛ, отличающаяся использованием аналитического условия равенства амплитуд составляющих отклика на его выходе в качестве критерия. Представленные результаты оптимизации витка МЛ и её ускорение подтвердили эффективность методики, а также применимость аналитического условия равенства амплитуд составляющих отклика для оптимизации.

В подразделе 3.2 исследовано влияние дополнительных опорных проводников на модальное разложение в витке МЛ с боковой связью. Сравнены

8 конфигураций поперечного сечения витка (с разным расположением опорных проводников) на основе расчёта коэффициентов связи и моделирования временного отклика витка МЛ (по схеме на рисунке 3.1).

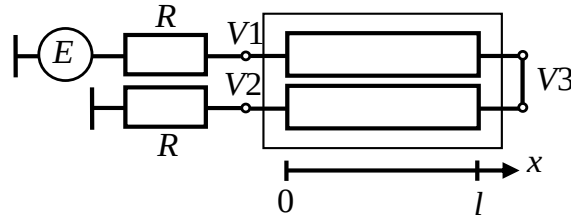


Рисунок 3.1 – Схема соединений витка МЛ (без дополнительных опорных проводников)

Затем исследованы временные и частотные характеристики прототипов витка МЛ с трассировкой в форме меандра без дополнительных проводников и с ними (рисунок 3.2). Далее они называются прототипами исходного и модифицированного витков. Такая трассировка использована для размещения прототипов на площади платы $80 \times 80 \text{ мм}^2$. В качестве основы принят FSD1020T с $h=508 \text{ мкм}$ ($t=35 \text{ мкм}$) и $\epsilon_r=3,38$. Параметры проводников: $w=300 \text{ мкм}$, $s_1=100 \text{ мкм}$. Они дают $\Delta\tau=0,552 \text{ нс/м}$. На заданной площади исходный виток можно свернуть в меандр из 19 полувитков (рисунок 3.2а) с расстоянием между ними $s_2=10w$. Тогда длина одного полувитка меандра без учета перемычек на его концах составит $l_i=65,86 \text{ мм}$. Модификация витка (рисунок 3.2б) заключается в добавлении заземленных проводников между полувитками меандра. Выбор ширины заземленных проводников w_2 и расстояние s_2 между ними и сигнальными проводниками s_3 зависит от их эффективности для уменьшения размеров витка при сохранении его защитных характеристик. Поэтому рассмотрено 10 наборов параметров. Выявлено, что все наборы позволяют уменьшить размеры прототипа с приемлемым сохранением защитных свойств. Поэтому выбран набор, обеспечивающий максимальное уменьшение ширины прототипа.

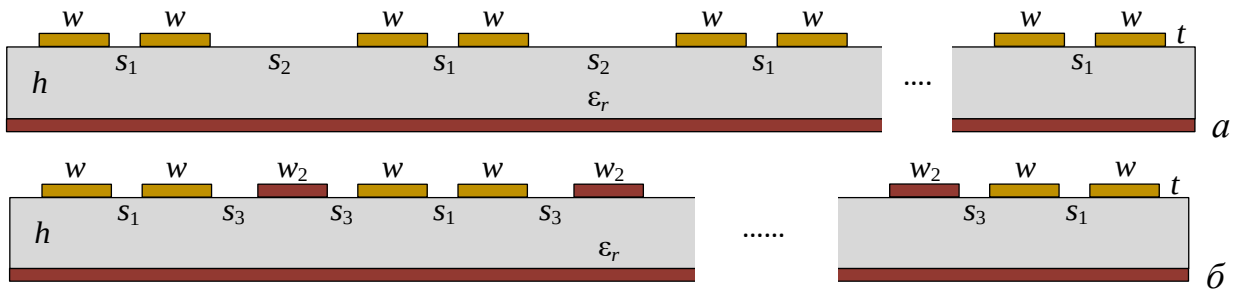


Рисунок 3.2 – Поперечные сечения исходного (а) и модифицированного (б) витков

На основе выполненного исследования и оптимизации при прототипировании приняты следующие параметры заземленных проводников модифицированного витка: $w_2=300 \text{ мкм}$, $s_3=900 \text{ мкм}$. Добавление дополнительных проводников уменьшило импедансную связь между полувитками в 1,6 раза и позволило увеличить длину сигнального проводника на той же площади до $l=3257 \text{ мм}$. Вид сверху изготовленных прототипов показан на рисунке 3.3.

Измерения в частотной области выполнены векторным анализатором цепей (ВАЦ) E50771C компании Agilent Technologies. Перед измерениями выполнена TOSM-калибровка ВАЦ. Для включения прототипов в тракт использованы коаксиально-микрополосковые переходы с вносимым затуханием не более 0,5 дБ

в диапазоне до 20 ГГц. На рисунке 3.4 показаны измеренные и полученные электродинамическим моделированием частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипов.

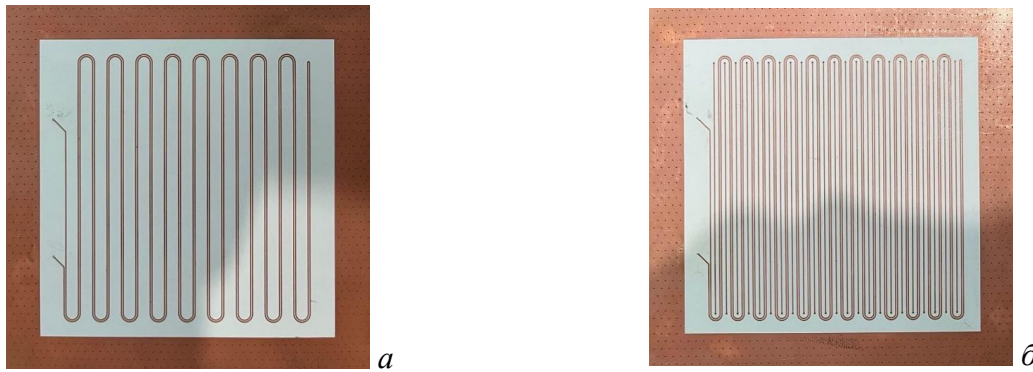


Рисунок 3.3 – Прототипы исходного (а) и модифицированного (б) витков с боковой связью

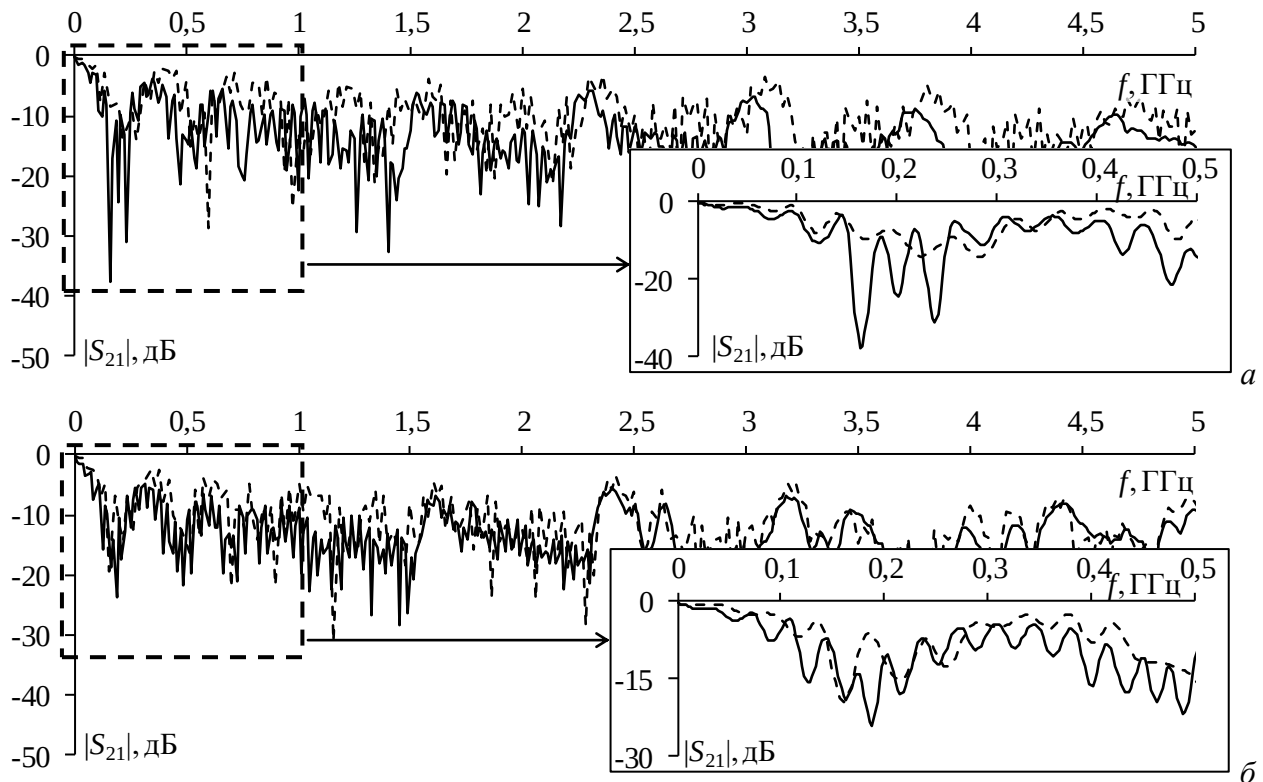
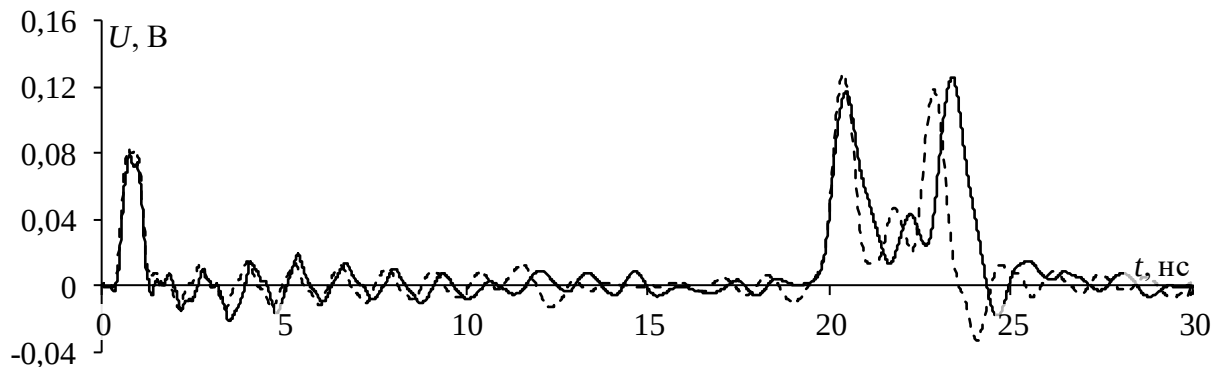


Рисунок 3.4 – Измеренные (—) и вычисленные (---) частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипов исходного (а) и модифицированного (б) витков с боковой связью

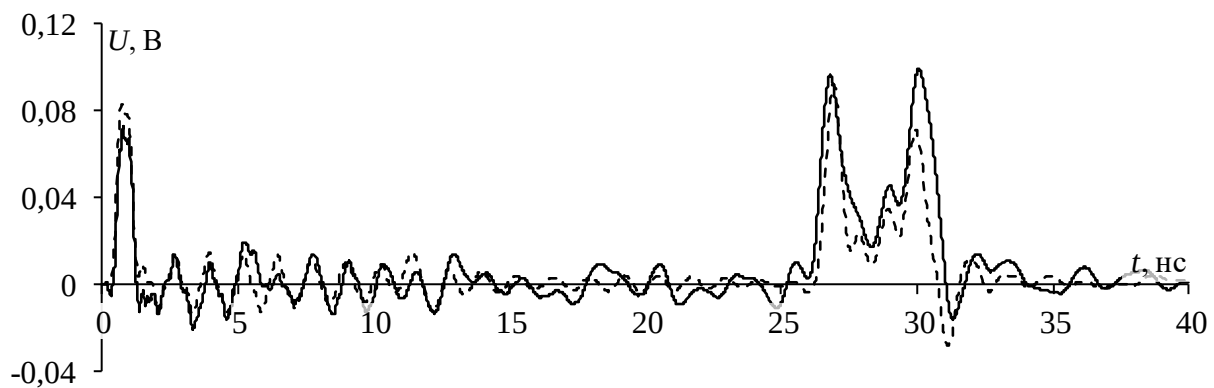
Видно, что зависимости на рисунке 3.4 приемлемо согласуются. Полоса пропускания исходного витка составила 62,7 и 120 МГц по измерениям и моделированию соответственно (рисунок 3.4а). Модификация увеличила число минимумов из-за отражений, что уменьшило полосу до 50 и 100 МГц при измерениях и моделировании соответственно (рисунок 3.4б).

На основе S -параметров получены временные отклики на выходе прототипов по результатам моделирования и измерений на воздействие СКИ с $E=1$ В и $t_z=900$ пс. Полученные формы напряжения показаны на рисунке 3.5. Видно, что на выходе прототипов воздействие разложено на 3 составляющие меньшей амплитуды. Ослабление на выходе обоих прототипов определяет чётная мода. Для исходного витка оно составило 4 раза, а модифицированного – 5 раз (заземленные проводники увеличили ослабление в 1,25 раза). По результатам измере-

ний вычислены N -нормы на входе (половина э.д.с.) и выходе прототипов (таблица 3.1). Видно, что N_1 уменьшилась в 3,97 и 5 раз в исходном и модифицированном витках соответственно. Таким образом, дополнительные проводники позволили уменьшить площадь витка и увеличить ослабление в 1,25 раза.



а



б

Рисунок 3.5 – Измеренные (—) и вычисленные (---) формы напряжения на выходе прототипов исходного (а) и модифицированного (б) витков с боковой связью

Таблица 3.1 – Вычисленные N -нормы при импульсном воздействии

Источник данных	N_1	$N_2 \times 10^{-9}$	$N_3 \times 10^{10}$	$N_4 \times 10^{10}$	$N_5 \times 10^6$
Входное воздействие	0,500	1,83	3	3	11,2
Исходный виток	0,126	0,403	3,16	4,50	4,96
Модифицированный виток	0,099	0,330	2,98	4,82	4,50

В подразделе 3.3 исследовано влияние дополнительных опорных проводников на модальное разложение в витке МЛ с лицевой связью. Сравнены 4 конфигурации поперечного сечения по эффективности модального разложения в витке МЛ на основе расчёта коэффициентов связи и временного отклика. В результате выбраны конфигурации с 1 и 2 опорными проводниками (рисунок 3.6). В качестве основы принят FSD1020T с параметрами из п. 3.2. Перед изготовлением прототипов выполнен численный анализ характеристик витка в диапазоне значений w и s . Оптимальные параметры витка с 1 опорным проводником составили $w=500$ мкм и $s=200$ мкм, а витка с 2 – $w=350$ мкм и $s=200$ мкм.

Выполнена трассировка каждого витка в форме меандра для размещения на площади $S=100 \times 100$ мм² (вид поперечного сечения показан на рисунке 3.7). В результате виток с 1 опорным проводником свернут в меандр из 11 полувитков, а с 2 – из 20 (рисунок 3.8). Далее они называются прототипами исходного и модифицированного витков с лицевой связью соответственно. Для них расстояния s_2 составили 8 и 3 мм соответственно.

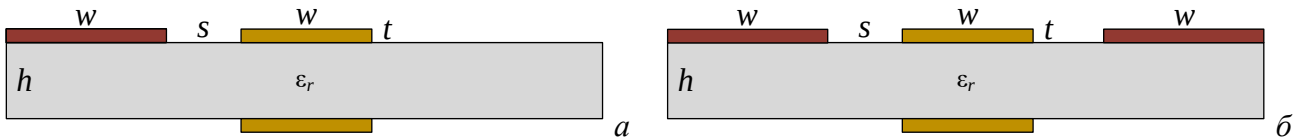


Рисунок 3.6 – Поперечные сечения витка с лицевой связью с 1 (а) и 2 (б) опорными проводниками

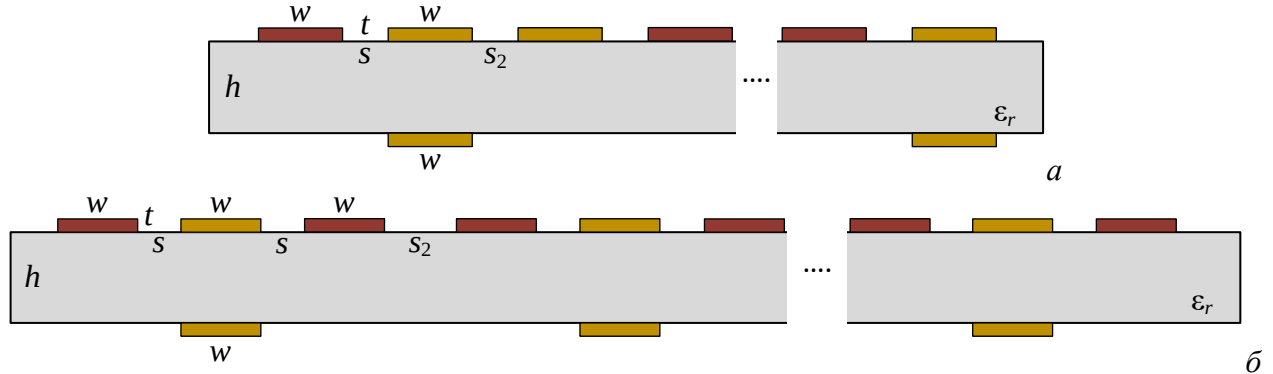


Рисунок 3.7 – Поперечные сечения прототипов 1 (а) и 2 (б)

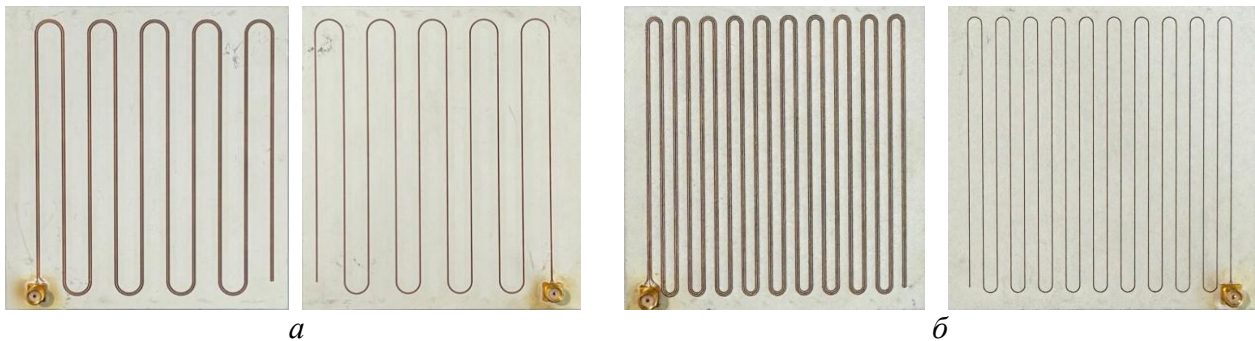


Рисунок 3.7 – Виды сверху (слева) и снизу (справа) прототипов исходного (а) и модифицированного (б) витков

На базе той же измерительной установки сняты частотные зависимости S -параметров прототипов. На рисунке 3.8 показаны зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне от 300 кГц до 5 ГГц. Также они получены электродинамическим моделированием. Они состоят из множества максимумов и минимумов. Результаты согласуются по характеру лишь на низких частотах (причем лучше для прототипа 1). Частота среза прототипа 1 составила 215 МГц, а прототипа 2 – 395 МГц.

На основе S -параметров получены временные отклики на импульсное воздействие с $E=1$ В и $t_z=900$ пс (рисунок 3.9). Видно, что формы напряжения согласуются по характеру, но отличаются по амплитуде и задержкам составляющих. Ослабление на выходе каждого прототипа определяют составляющие перекрестной помехи, причём их формы и амплитуды близки. Различие амплитуд и задержек других составляющих вызвано влиянием потерь, дисперсии и отражений. Добавление второго опорного проводника увеличило уровень комбинационной составляющей, а также ослабление воздействия. Для оценки этого вычислены N -нормы по результатам измерений (таблица 3.2).

Видно, что на выходе прототипов 1 и 2 ослабляются все нормы, кроме N_4 . Ослабление N_1 для прототипа 1 составило 2,8 раза, а 2 – 4,16 раза. Рост ослабления вызван ростом уровня комбинационной составляющей и уменьшением перекрестной помехи за счёт добавления дополнительного опорного проводника.

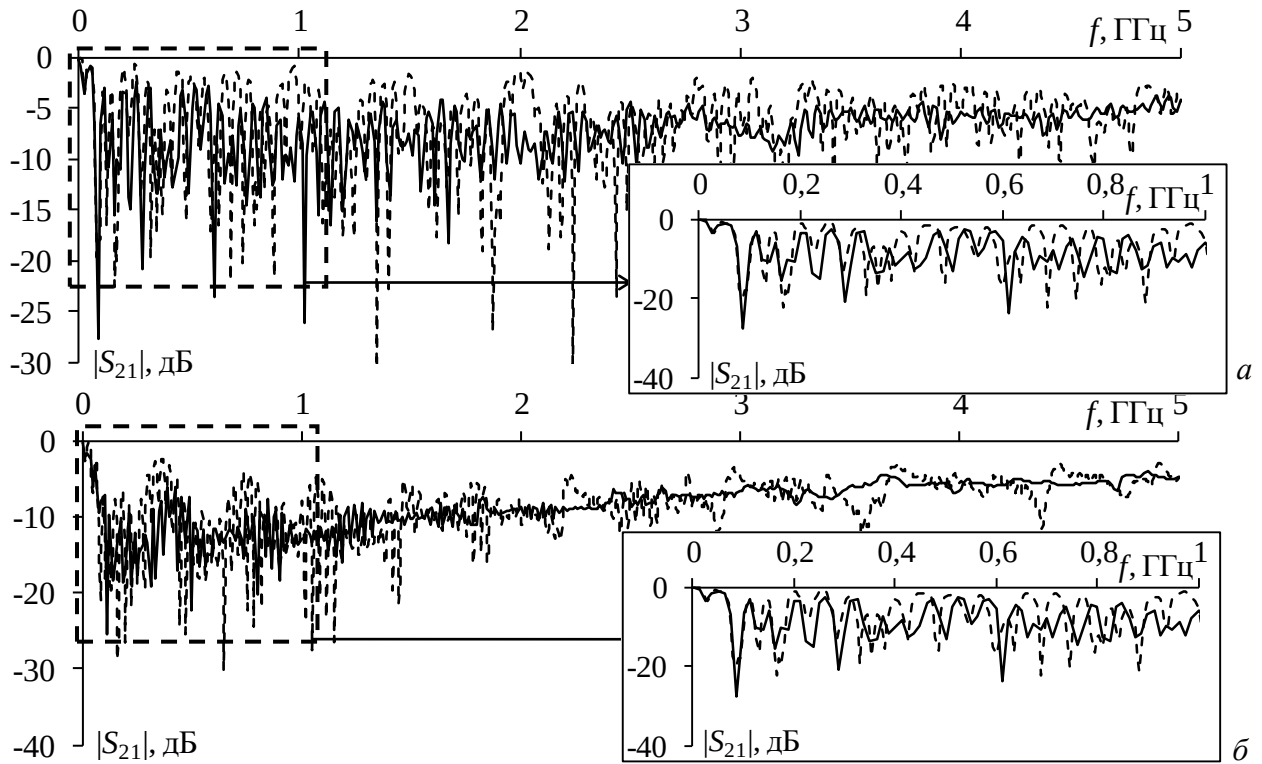


Рисунок 3.8 – Измеренные (—) и вычисленные (---) зависимости $|S_{21}|$ прототипов 1 (а) и 2 (б)

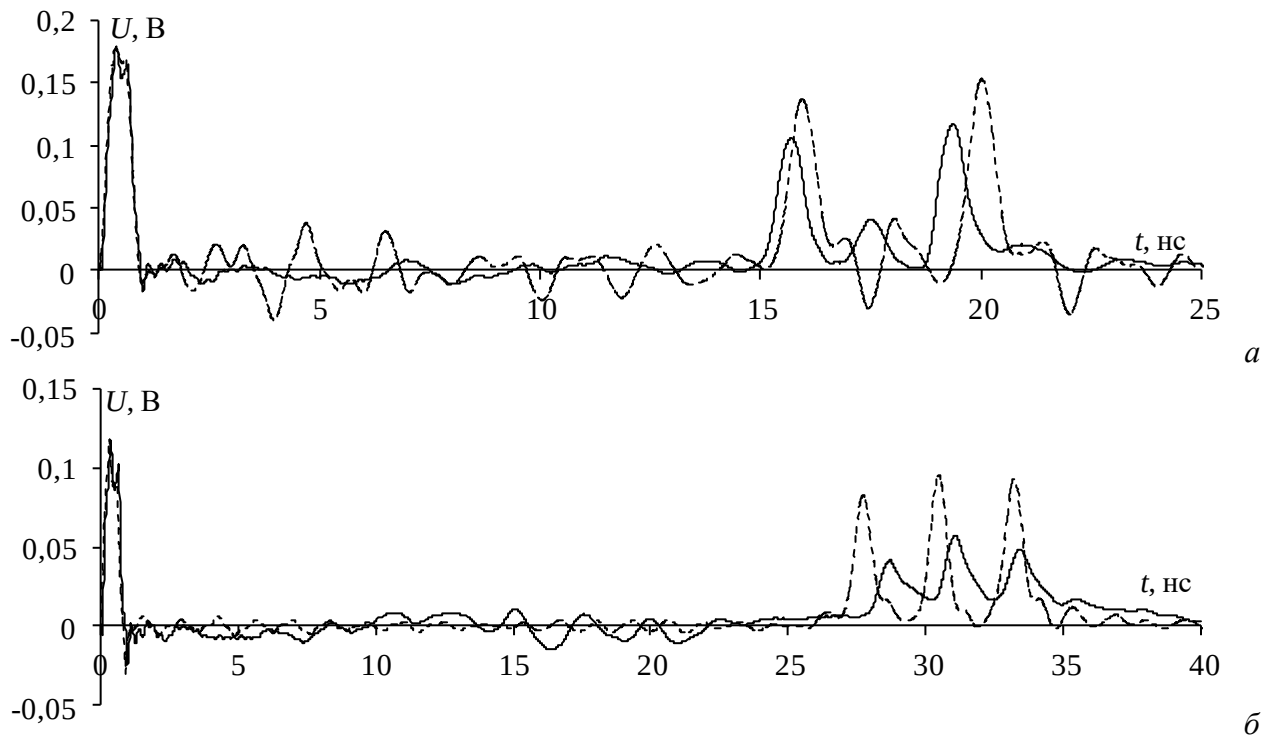


Рисунок 3.9 – Измеренные (—) и вычисленные (---) формы напряжения на выходе прототипов 1 (а) и 2 (б)

Таблица 3.2 – Вычисленные нормы для прототипов 1 и 2

Способ	N_1	$N_2 \times 10^{-9}$	$N_3 \times 10^{10}$	$N_4 \times 10^{10}$	$N_5 \times 10^6$
Входное воздействие	0,5	1,83	3,14	3,14	11,2
Прототип 1	0,18	1,03	3,45	4,99	5,5
Прототип 2	0,12	0,82	2,93	4,53	3,68

Таким образом, введение дополнительного опорного проводника в поперечное сечение витка с лицевой связью и трассировкой в форме меандра спо-

собою увеличить ослабление импульсного воздействия длительностью 900 пс в 1,5 раза и расширить полосу пропускания витка в 1,8 раза.

4. Совершенствование полосковых устройств на основе витка меандровой линии

В подразделе 4.1 выполнены оценки влияния радиопоглощающего материала (РПМ) на характеристики витка МЛ с боковой связью и трассировкой в форме меандра и спирали. Результаты важны в качестве предварительных оценок, но для прототипирования устройств нужно моделирование их временного отклика.

В подразделе 4.2 выполнено электродинамическое моделирование витка МЛ с разной трассировкой. В качестве основы взята подложка из FR-4 с $h=250$ мкм ($t=35$ мкм) и $\epsilon_{r1}=4,59$ ($\tan\delta_1=0,023$). После оптимизации по критерию согласования витка с трактом 50 Ом получено $w=400$ мкм и $s=200$ мкм. Трассировка витка в форме меандра или спирали приводит к искажениям из-за взаимовлияний соседних полувитков. Для исключения этого расстояние между полувитками сначала принято $s_2=10w$. Как показано ранее, уменьшить их взаимовлияние возможно за счёт введения заземленных проводников между полувитками меандра. Поэтому дополнительно принято $s_2=2w$. В качестве РПМ использован ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 с толщиной $h_2=1$ мм ($\epsilon_{r2}=20$ и $\mu_{r2}=3$, $\tan\delta_2=0,1$, $\tan\delta_{\mu 2}=0,5$). Всего рассмотрено 16 моделей витка МЛ (8 без РПМ и 8 с РПМ) с разной трассировкой, без заземленных проводников и с ними, и при разном s_2 . Результаты моделирования в частотной области показали существенное влияние РПМ на передаточные характеристики витка из-за рассогласования с трактом. Заземленные проводники при $s_2=2w$ улучшают передаточные характеристики витка в полосе пропускания. Трассировка в форме спирали даёт более пологую зависимость $|S_{21}|$. В результате моделирования временного отклика (воздействовал импульс в форме трапеции с $t_\Sigma=300$ пс и амплитудой э.д.с. 1 В) показали, что без РПМ уменьшение s_2 увеличивает максимум выходного напряжения, а с РПМ, наоборот, уменьшает его. Добавление заземленных проводников уменьшает выходное напряжение (более существенно в витке с РПМ). Ресурсом для роста ослабления является уменьшение уровня перекрестной помехи за счёт оптимизации связи между проводниками витка с РПМ.

В подразделе 4.3 представлены результаты экспериментальных исследований прототипов. В качестве примера на рисунке 3.38 показаны изготовленные прототипы витка с трассировкой в форме меандра и спирали без дополнительных проводников и с ними при $s_2=10w$. Для краткости, прототипы витка в форме меандра и спирали без заземленных проводников называются ниже прототипами 1 и 2 соответственно, а с заземленными – 3 и 4. На обратной стороне смонтированы SMA-соединители.

Измерены частотные зависимости S -параметров прототипов в диапазоне от 300 кГц до 5 ГГц с помощью ВАЦ Panorama P4226 АО «НПФ «Микран». Перед этим выполнена калибровка ВАЦ с помощью эталонных мер из набора НКММ-13-13Р. Погрешность измерений составила не более 1,5 дБ. Зависимости $|S_{21}|$ прототипов 1 и 2 при $s_2=10w$ и $2w$ показаны на рисунке 4.2.



Рисунок 4.1 – Вид сверху изготовленных прототипов 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) при $s_2=10w$

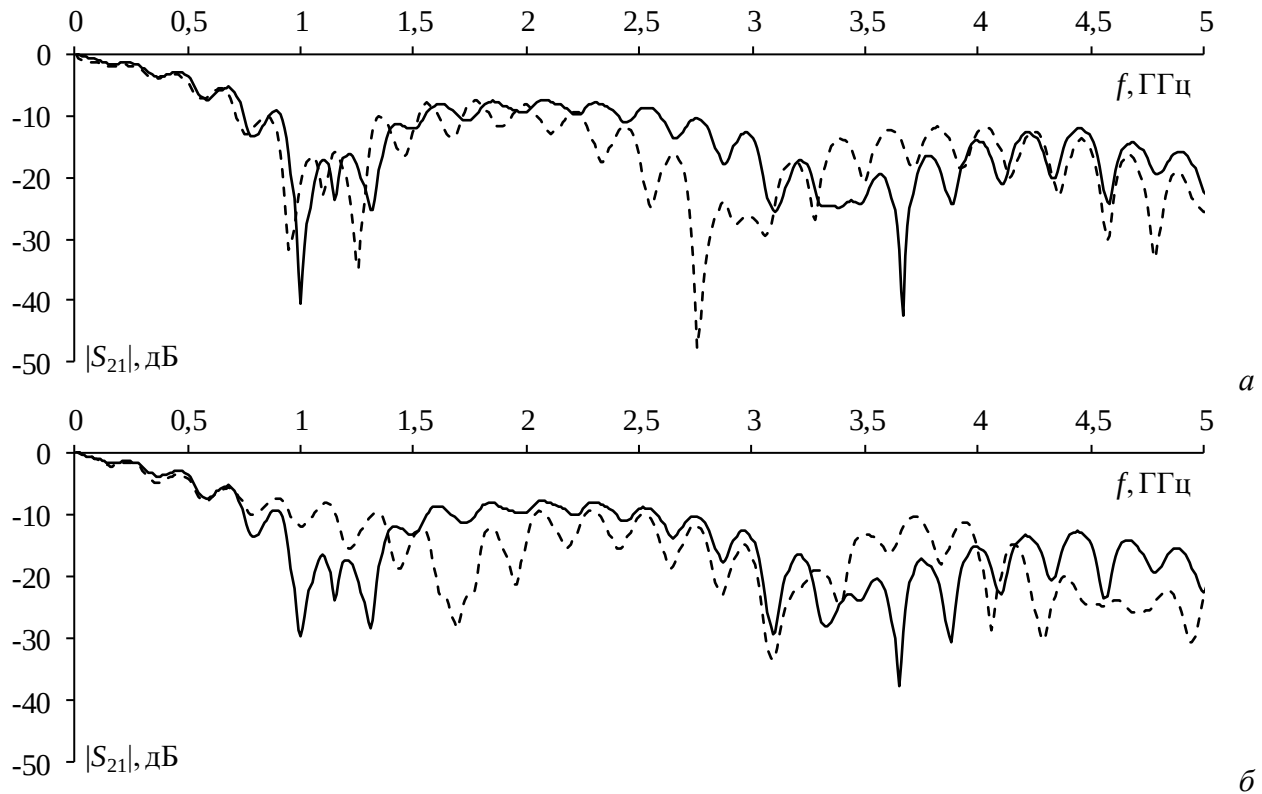


Рисунок 4.2 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипов 1 (—) и 2 (---) при $s_2=10w$ (а) и $2w$ (б)

Из рисунка 4.2 видно, что полученные частотные зависимости близки по характеру, однако трассировка повлияла на число и уровни их максимумов и минимумов. При $s_2=10w$ для прототипа 1 $f_{cp}=340,5$ МГц, а 2 – $f_{cp}=315,5$ МГц. Уменьшение s_2 до $2w$ для прототипа 1 дало $f_{cp}=335,5$ МГц, а 2 – $f_{cp}=305,5$ МГц. Таким образом, трассировка в форме спирали привела к снижению f_{cp} прототипов. При уменьшении s_2 с $10w$ до $2w$ f_{cp} также уменьшилась.

На основе S -параметров получены отклики на импульсное воздействие с $E=1$ В и $t_{\Sigma}=300$ пс. На рисунке 4.3 приведены формы напряжения на выходе прототипов 1 и 2 при $s_2=10w$ и $2w$. Видно, что при $s_2=10w$ они согласуются, а отличие задержек составляющих вызвано влиянием проводных отводов для включения прототипов в тракт. Надо отметить, что трассировка в форме спирали минимизирует отражения от поворотов витка на 90° при трассировке в форме меандра. Максимум напряжения на выходе прототипов определяю составляющие мод. При $s_2=10w$ для прототипа 1 он составил 147,5 мВ, а 2 – 133,8 мВ. При $s_2=2w$ в прототипе 2 наблюдается неполное разложение воздействия на составляющие из-за недостаточной разности погонных задержек. Максимум напряжения на выходе прототипа 1 составил 144 мВ, а 2 – 123 мВ. Таким образом, трассировка витка в форме спирали увеличивает ослабление воздействия.

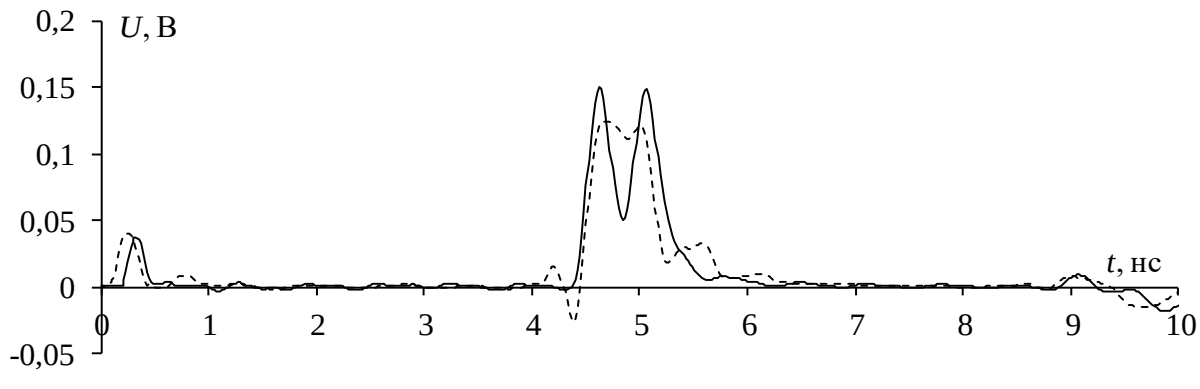
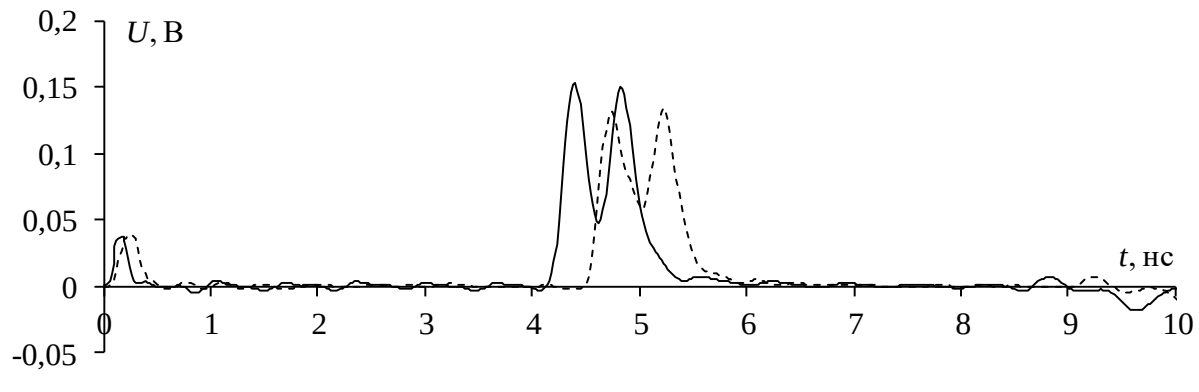


Рисунок 4.3 – Формы напряжения на выходе прототипов 1 (—) и 2 (---) при $s_2=10w$ (а) и $2w$ (б)

Рассмотрим прототипы 3 и 4 (с заземленными проводниками для уменьшения связи между полувитками меандра и спирали). Для экономии места здесь приведены результаты только при $s_2=2w$ без РПМ и с ним. На рисунке 4.4 показаны частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипов 3 и 4.

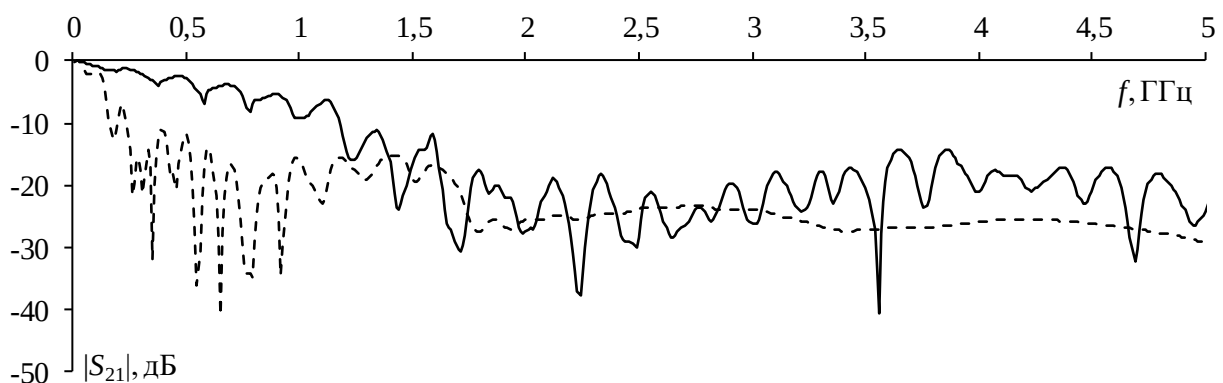
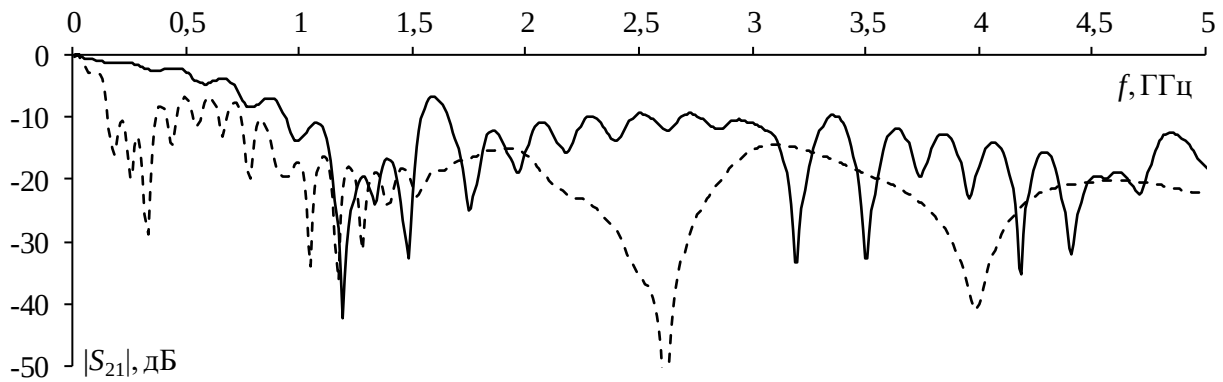
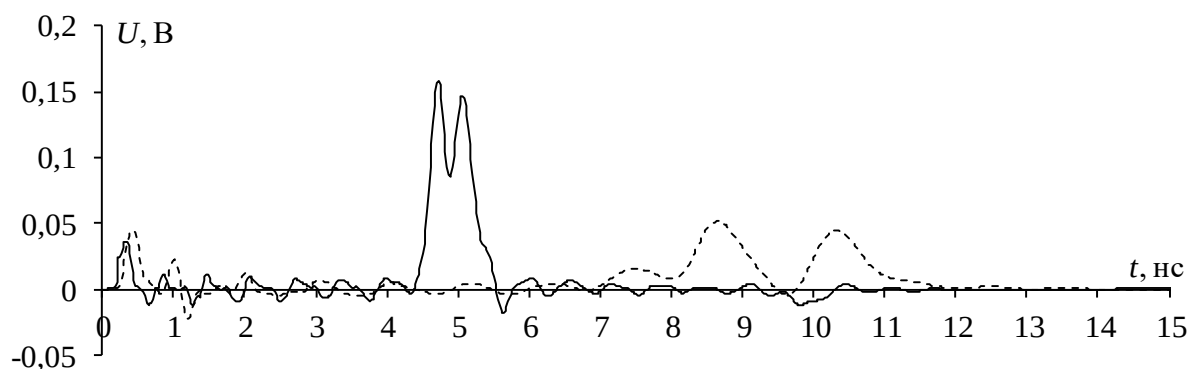


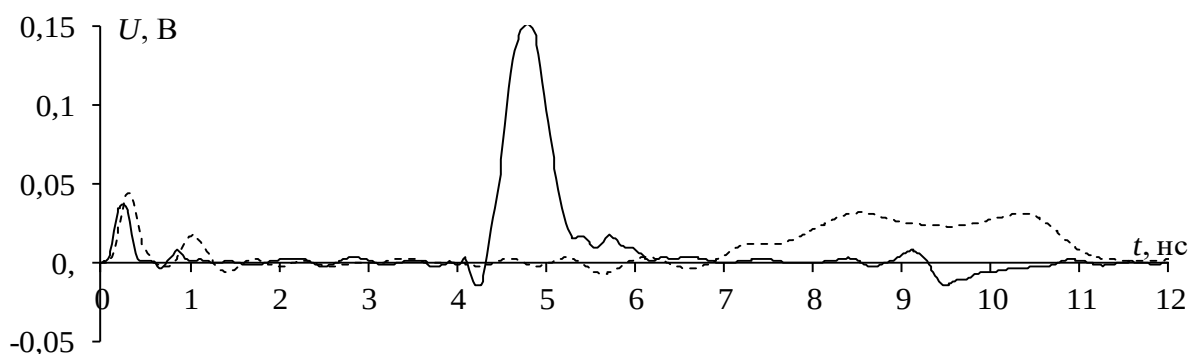
Рисунок 4.4– Частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипов 3 (а) и 4 (б) без РПМ (—) и с ним (---)

Видно, что нанесение РПМ уменьшило f_{cp} прототипов из-за рассогласования прототипов с трактом. Для прототипа 3 без РПМ $f_{cp}=515,5$ МГц, а с РПМ – $f_{cp}=115$ МГц. Для прототипа 4 без РПМ $f_{cp}=340$ МГц, а с РПМ – $f_{cp}=115$ МГц.

На рисунке 4.5 показаны временные отклики на выходе прототипов 3 и 4 без РПМ и с ним на импульсное воздействие с $E=1$ В и $t_{\Sigma}=300$ пс. Видно, что нанесение РПМ снизило уровни составляющих мод, поэтому максимум напряжения на выходе прототипов с РПМ определяет перекрестная помеха. Надо отметить, что в прототипе 3 без РПМ составляющие мод налагаются, а в 4 – разложения нет. Максимум напряжения на выходе прототипа 3 без РПМ составил 155 мВ, а с РПМ – 51,6 мВ. На выходе прототипа 4 без РПМ максимум напряжения составил 148 мВ, а с РПМ – 43,8 мВ. Таким образом, существенно в прототипах 3 и 4 с РПМ ослабление выше, чем в 1 и 2.



а



б

Рисунок 4.5 – Формы напряжения на выходе прототипов 3 (а) и 4 (б) без РПМ (—) и с ним (---)

В подразделе 4.4 выполнен анализ эффективности прототипов. Сначала оценено ослабление N -норм при воздействии СКИ с $E=1$ В и $t_{\Sigma}=300$ пс (таблица 4.1). Вычислено отношение (N_{i_in}/N_{i_out} , где N_{i_in} и N_{i_out} – i -я норма на входе и выходе соответственно). Видно, что все прототипы обеспечивают ослабление всех N -норм, хотя для N_3 оно низко. Минимум ослабления N_1 получен для прототипа 1 без РПМ при $s_2=2w$ составил 2,92 раза, а максимум 4,78 раза для прототипа 2 при $s_2=2w$. Рост ослабления связан с минимизацией отражений. Минимум ослабления N_2 одинаков для прототипа 1 при $s_2=2w$ и $10w$ (около 5 раз), а максимум выявлен в прототипе 4 (11,66 раза). Среднее ослабление N_4 составило около 1,8 раза, а N_5 – 2,4 раза. Ослабление N -норм в прототипах с трассировкой в форме спирали выше, чем в меандре (например, в прототипе 2 по сравнению с прототипом 1 при $s_2=10w$ в 1,2 раза, а при $s_2=2w$ – в 1,6 раза).

Таблица 4.1 – Ослабление N -норм на выходе прототипов

Прототип	Наличие РПМ	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
$s_2=10w$						
1	–	3,32	5,05	1,1	1,85	2,31
	+	8,04	14,35	1,1	1,77	3,32
2	–	4,11	6,81	1,18	2,14	2,59
	+	9,33	14,86	1,49	2,23	3,97
3	–	3,39	5,31	1,07	1,88	2,33
	+	8,51	16,92	1,28	2,11	3,69
4	–	4,33	7,87	1,05	1,89	2,63
	+	9,45	13,67	1,1	1,87	3,47
$s_2=2w$						
1	–	2,92	4,98	1,07	1,53	2,11
	+	7,79	6,47	1,35	1,91	3,47
2	–	4,78	7,91	1,04	1,83	2,64
	+	9,76	14,04	2,13	2,03	4,67
3	–	3,19	6,54	1,07	1,67	2,17
	+	9,79	12,64	2,24	2,28	4,52
4	–	3,86	11,66	1,07	1,66	2,38
	+	11,93	17,47	1,83	1,76	4,65

РПМ дал рост ослабления всех N -норм. Он увеличил ослабление N_1 в 2 и более раз. Ослабление N_2 также возросло, причем для прототипов при $s_2=10w$ больше. Примечательно, что РПМ дал рост ослабления N_3 , хотя оно, по-прежнему, низко. Рост ослабления N_4 и N_5 за счёт РПМ также мал. Общий рост ослабления N_1 за счёт дополнительных опорных проводников и РПМ составил 3,3 раза для трассировки в форме меандра и 2,5 раза – в форме спирали.

Таким образом, трассировка в форме спирали витка микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением, по сравнению с трассировкой в форме меандра при одинаковой длине печатного проводника и включении в тракт 50 Ом, способна увеличить ослабление импульсного воздействия длительностью 300 пс в 1,6 раза. Модификация витка микрополосковой линии с симметричным поперечным сечением за счёт трассировки в форме меандра, добавления опорных проводников между его полувитками и нанесения радиопоглощающего материала на поверхность витка, способна увеличить ослабление импульсного воздействия длительностью 300 пс в 3,3 раза.

Также оценена целостность цифрового сигнала на выходе прототипов. Выявлено, что добавление РПМ её ухудшает, что согласуется с результатами измерений в частотной области. Без дополнительной оптимизации они применимы только в низкоскоростных приложениях. Наконец, оценена эффективность прототипов для ослабления воздействий реальных генераторов ПдЭМВ. Выявлено, что они эффективно ослабляют воздействия, длительность которых сопоставима с принятой для СКИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена важная научная задача совершенствования характеристик устройств на основе витка МЛ для защиты РЭС от СКИ.

Результаты исследования

1. Анализ влияния диэлектрического покрытия печатной платы на уровень перекрестных помех в связанной линии выявил, что нанесение покрытия, даже минимальной толщины, компенсирует дальнюю перекрестную помеху во всех возможных режимах согласования линии с трактом.

2. Анализ перекрестных связей в связанной линии выявил, что добавление дополнительного заземленного проводника между сигнальными проводниками уменьшает (до 5 раз) коэффициенты связи в линии, даже при его минимальной ширине.

3. Сравнение эффективности разных способов уменьшения перекрестных связей в связанной линии (разнос проводников, покрывающий диэлектрик и заземленный проводник) выявило, что при малой протяженности межсоединения эффективно добавление заземленного проводника, а при большой он может быть неэффективен.

4. Оценено влияние дополнительных опорных проводников на эффективность модального разложения в связанных линиях с боковой и лицевой связью. Оценка их вторичных параметров выявила наиболее эффективные из конфигураций.

5. Экспериментально доказано, что добавление заземленных проводников в структуру витка МЛ микрополосковой линии с трассировкой в форме меандра даёт рост ослабления импульсного и гармонического воздействий в 1,25 и 1,5 раза соответственно.

6. Экспериментально доказано, что дополнительный опорный проводник в витке МЛ с лицевой связью увеличивает ослабление импульсного воздействия на его выходе в 1,5 раза за счёт роста уровня комбинационной составляющей и уменьшения уровня основных составляющих отклика.

7. Анализ способов совершенствования характеристик витка показал, что нанесение РПМ эффективно для уменьшения размеров витка с боковой связью за счёт существенного роста Δt , а добавление заземленного проводника при его трассировке в форме меандра и спирали эффективно для минимизации связи, даже при уменьшении расстояния между проводниками витка с $10w$ до $2w$.

8. Изготовлены 16 прототипов витка МЛ с трассировкой в форме меандра и спирали без заземленных проводников и РПМ и с ними.

9. Измерения в частотной области показали, что нанесение РПМ ухудшает передаточные характеристики прототипов (уменьшает f_{cp}), а трассировка в виде спирали и добавление заземленных проводников позволяют их улучшить.

10. Результаты измерений в частотной области доказали эффективность предложенных способов совершенствования характеристик витка: трассировка в форме спирали позволяет увеличить ослабление за счёт исключения влияния отражений (рост ослабления до 1,6 раза); введение заземленных проводников при $s_2=2w$ уменьшает размеры прототипов; РПМ увеличивает ослабление от 2 до 3,3 раза (его максимум составил 17,47 раза в витке с трассировкой в форме спирали с заземленными проводниками при $s_2=2w$).

11. Доказана эффективность усовершенствованных прототипов витка МЛ для ослабления воздействий реальных генераторов ПдЭМВ.

Таким образом, совокупность полученных результатов подтверждает эффективность рассмотренных способов совершенствования характеристик полосковых устройств на основе витка МЛ для ослабления СКИ.

Рекомендации

1. Исследованные способы совершенствования характеристик полосковых устройств на основе витка МЛ рекомендуются для повышения эффективности устройств с модальным разложением.

2. Предложенные в диссертации методики моделирования, оптимизации и проектирования рекомендуются для создания других полосковых устройств с модальным разложением.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Разработка средств автоматизированного синтеза полосковых устройств на основе витка МЛ с применением разработанных методик моделирования, оптимизации и проектирования.

2. Исследование гибридных устройств защиты на основе традиционных средств совместно с предложенными в работе полосковыми устройствами на основе витка МЛ.

3. Экспериментальная апробация способов и прототипов для защиты от импульсных воздействий реальных генераторов высокой мощности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК (4)

1. Суровцев Р.С. Миниатюризация устройства на основе витка меандровой линии с помощью дополнительных заземленных проводников / Р.С. Суровцев, С. Карри, **И.А. Скорняков** // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т.25, №3. – С. 14–20.

2. Карри С. Методика параметрической оптимизации полосковых устройств с модальным разложением / С. Карри, Р.С. Суровцев, П.В Микола, **И.А. Скорняков** // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 1. – С. 95–117.

3. Суровцев Р.С. Комплексное исследование влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка меандровой линии / Р.С. Суровцев, С. Карри, **И.А. Скорняков** // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – №2. – С. 30–42.

4. **Скорняков И.А.** Сравнение эффективности методов уменьшения перекрестных связей в линиях передачи печатных плат / И.А. Скорняков, С. Карри, Р.С. Суровцев, А.Е. Мандель // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 22–28.

Статьи в журналах из перечня ВАК по смежной отрасли науки (1)

5. **Скорняков И.А.** Влияние мощных электромагнитных импульсов на работу типовых интегральных микросхем / И.А. Скорняков, С. Карри, Р.С. Суровцев // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 10.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus (3)

6. Mikola P. The influence of cross-sectional configuration on the synthesis of strip devices with modal decomposition / P. Mikola, **I. Skorniyakov**, R. Surovtsev // 2025

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2025. – P. 271–276.

7. **Skornyakov I.** The effect of reference conductors on the efficiency of modal decomposition in a turn of a broad-side coupled meander line / I. Skornyakov, R. Surovtsev, S. Karri // 2025 IEEE International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2025. – P. 1–4.

8. Karri S. The influence of meander line turn routing on modal decomposition of ultrashort pulses / S.H. Karri, **I. Skornyakov**, R. Surovtsev // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2025. – P. 277–281.

Доклады в трудах отечественных конференций (4)

9. **Скорняков И.А.** Анализ влияния параметров влагозащитного покрытия на амплитуду перекрестных наводок в паре связанных линий / И.А. Скорняков // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, 2020. – № 1. – С. 269–272.

10. **Скорняков И.А.** Оценка влияния способов заземления защитной трассы связанной двухпроводной линии на перекрестные наводки / И.А. Скорняков // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, 2021. – № 1. – С. 83–86.

11. **Скорняков И.А.** Анализ влияния ширины развязывающей трассы на амплитуду перекрестных наводок в связанной двухпроводной линии / И.А. Скорняков, Р.С. Суровцев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, 2021. – № 1. – С. 86–91.

12. **Скорняков И.А.** Влияние радиопоглощающего материала на защитные свойства витка меандровой линии / И.А. Скорняков, П.В. Микола // Материалы трудов 31-й межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС31-2025)». – Томск, 2025. – С. 101–106.

Патент

13. Патент 2856214 С1 Российская Федерация, МПК Н03Н 7/30 (2006.01) Меандровая линия задержки с лицевой связью и двумя опорными проводниками, защищающая от сверхкоротких импульсов / Р.С. Суровцев, **И.А. Скорняков**, С. Карри. № 2025127715; заявл. 09.10.2025; выдан 20.02.2026.