

На правах рукописи

Карри

Карри Салим

**Полосковые устройства защиты на основе витка
меандровой линии с модифицированной структурой**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

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

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

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

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

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет»

Защита состоится 12 декабря 2023 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/jyy8iczs>

Автореферат разослан ____ октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стремительное развитие радиоэлектронных средств (РЭС) позволило им найти применение во многих сферах, где бесперебойная работа РЭС является важным требованием, поскольку их выход из строя может привести к существенным последствиям. Современные тенденции развития РЭС требуют их компактности и быстродействия. Для достижения первого увеличивают плотность трассировки, а второго – граничную частоту спектра используемых сигналов. Применение в составе РЭС интегральных схем и микропроцессоров связано со снижением напряжений и токов используемых сигналов. Эти факторы привели к снижению порога восприимчивости РЭС к электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Среди них особенно опасны мощные сверхширокополосные (СШП) воздействия, которые часто представляют собой импульсные воздействия, время нарастания которых может быть менее 100 пс, а общая длительность – всего несколько наносекунд. Широкий спектр СШП воздействий позволяет части их частотных компонент проникать внутрь РЭС, минуя средства защиты. Их амплитуда может достигать нескольких киловольт, а распространение по проводникам – приводить к пробоям полупроводников и диэлектриков. Для защиты применяются конструктивные и схемотехнические средства, но они не всегда эффективны из-за паразитных параметров выводов компонентов, низких быстродействия и напряжения пробоя, малых мощности и ресурсах. Таким образом, из-за недостатков существующих решений, поиск путей более эффективной защиты РЭС от СШП воздействий актуален.

Степень разработанности темы. Повышение защиты РЭС от мощных СШП воздействий исследовали М. Backstrom, F. Brauer, J. Haseborg, F. Rachidi, W. Radasky, F. Sabath и др. Анализом стойкости электронных систем к помехам и созданием методов измерений занимались Б.Б. Акбашев, Л.Н. Кечиев, В.Ю. Кириллов, Л.О. Мырова и др., а исследованием влияния СШП помех на вычислительную технику – З.М. Гизатуллин, Р. Киричек С.Ф. Чермошенцев и др. Разработку фильтров с распределенными параметрами вели М. Camp, R. Krzikalla, T. Weber и др. Среди отечественных учёных, исследование связанных линий и полосковых устройств ведут Б.А. Беляев, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов, А.Н. Сычев и др. Исследование модальных явлений и разработку устройств защиты на их основе в ТУСУРе ведет группа под руководством Т.Р. Газизова. Преимуществом таких устройств является то, что защита может не требовать устройства как такового, а вместо него используется специальная трассировка проводников, защищающая от помех. Модальное разложение в многопроводных линиях передачи исследуют А.О. Белоусов, Е. Жечев, А.М. Заболоцкий и Е.Б. Черникова, а в меандровых линиях – З.М. Кенжегулова, А.В. Носов и Р.С. Суровцев. Между тем возможность модификации устройств защиты на основе витка меандровой линии не исследованы.

Цель работы – улучшить характеристики полосковых устройств защиты на основе витка меандровой линии за счёт модификации их структуры.

Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ ослабления помеховых воздействий в полосковых устройствах защиты на основе витка меандровой линии.

2. Предложить способы модификации структуры полосковых устройств защиты на основе витка меандровой линии.

3. Выполнить экспериментальное исследование полосковых устройств на основе витка меандровой линии с модифицированной структурой.

Научная новизна

1. Предложена трассировка витка меандровой линии с симметричным поперечным сечением, в котором обеспечивается модальное разложение импульсного сигнала на составляющие, отличающаяся сворачиванием витка в виде меандра со слабой электромагнитной связью между его полувитками.

2. Разработан подход к уменьшению электромагнитной связи между полувитками витка меандровой линии с симметричным поперечным сечением, свернутого в меандр, отличающийся добавлением, заземленных на концах, дополнительных проводников между неосновными полувитками.

3. Доказана возможность дополнительного ослабления импульсного воздействия в витке меандровой микрополосковой линии, отличающаяся увеличением ширины одного из проводников витка.

Теоретическая значимость

1. Оценено влияние дискретизации границ структуры на результаты электродинамического моделирования временного отклика витка меандровой линии с симметричным поперечным сечением.

2. Исследованы особенности влияния длины и ширины проводника витка меандровой линии с симметричным поперечным сечением на рассеяние мощности гауссова импульса из-за всех видов потерь.

3. Предложены 3 модификации структуры витка меандровой линии для улучшения характеристик полосковых устройств защиты на их основе.

Практическая значимость

1. Показана возможность уменьшения на 45% ширины поперечного сечения витка меандровой линии, свернутого в меандр, с сохранением свойств защиты за счёт добавления дополнительных заземленных проводников.

2. Разработаны и измерены характеристики 5 прототипов устройств на основе витка меандровой линии, обеспечивающих разложение импульсных сверхширокополосных воздействий.

3. Экспериментально доказано, что увеличение асимметрии поперечного сечения витка меандровой линии увеличивает амплитуду дополнительного импульса разложения, ослабляя импульсное сверхширокополосное воздействие.

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

Положения, выносимые на защиту

1. Применение предложенной трассировки витка меандровой линии с симметричным поперечным сечением в виде меандра со слабой связью позволяет уменьшить занимаемую витком площадь с сохранением полосы пропускания и ослабления трапецеидального импульсного воздействия.

2. Добавление дополнительных проводников, заземленных на концах, между неосновными полувитками витка меандровой линии с симметричным поперечным сечением и трассировкой в виде меандра уменьшает связь между

неосновными полувитками, увеличивает длину исходного витка при неизменной занимаемой площади и позволяет ослабить трапецеидальное импульсное воздействие.

3. Увеличение ширины одного из проводников витка меандровой микрополосковой линии позволяет выравнять амплитуды импульсов разложения и дополнительно уменьшить амплитуду импульсного воздействия длительностью 900 пс на выходе витка в 1,45 раза.

Результаты соответствуют п. 15 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

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

Достоверность результатов основана на корректном применении теории линий передачи, совпадении результатов моделирования квазистатическим и электродинамическим подходами и их согласованности с результатами измерений сертифицированными и поверенными аппаратно-программными комплексами.

Использование результатов исследований

1. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект RFMEFI57417X0172, 2017–2020 г.

2. НИР «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.

3. НИР «Моделирование распространения сверхкоротких импульсов в многопроводных линиях передачи для решения задач проектирования радиоэлектронной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости», грант РФФИ «Научное наставничество» 19-37-51017, 2019–2021 гг.

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

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

6. НИР «Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для задач моделирования помехового синусоидального

воздействия на печатные устройства защиты при проектировании радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости» по гранту Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых, проект МК-396.2022.4, 2022–2023 гг.

7. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУРа.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах грантов: РФФИ (проект 21-79-00161 2021–2023 гг.); государственного задания (проекты FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг., FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.); Президента Российской Федерации (проект МК-396.2022.4, 2022–2023 гг.).

Результаты докладывались на следующих конференциях: Всерос. научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2018–2021 гг.; Межд. научно-практич. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018, 2019, 2021 гг.; Межд. научная конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации (Шарыгинские чтения), г. Томск, 2021 г.; Всерос. межвузовская научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика-2023», г. Москва, 2023 г.; 2019 Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON), г. Томск, 2019 г.; Int. IEEE scientific and technical conf. «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», г. Омск, 2021 г.; Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, Алтай, 2022 гг.

Публикации. Результаты отражены в 16 публикациях (2 без соавторов): 4 статьи в журналах из перечня ВАК; 3 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 9 докладов в трудах других конференций.

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 при его участии и совместно с научным руководителем. Личный вклад автора состоит в моделировании разными методами, разработке прототипов и экспериментальных исследованиях. Часть результатов получена совместно с Кенжегуловой З.М.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 167 наименований, 1 приложение из 4 с. Общий объем диссертации с приложениями – 184 с., в т.ч. 101 рисунок и 34 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Защита от электромагнитных воздействий и методы её моделирования: обзор

В разделе 1.1 показана актуальность защиты РЭС от мощных СШП воздействий. **В разделе 1.2** приведен обзор источников преднамеренных ЭМВ. **В разделе 1.3** представлены традиционные решения для защиты РЭС от ЭМВ, среди которых выделены полосковые устройства защиты на основе модального

разложения сигнала. В разделе 1.4 приведены методы моделирования и анализа полосковых устройств. В разделе 1.5 сформулированы цель и задачи работы.

2. Анализ искажения помеховых воздействий

в полосковых устройствах защиты на основе витка меандровой линии

В разделе 2.1 оценено влияние параметров дискретизации модели витка меандровой линии (МЛ) на результаты электродинамического моделирования его временного отклика. Выявлено, что влияние может быть существенным: до 12% по амплитуде составляющих отклика на выходе витка. Показано, что для получения более точных результатов нужно использовать адаптивное изменение сетки дискретизации, хотя затраты на моделирование при этом могут возрасти в 8,1 раза на рассмотренном примере.

В разделе 2.2 представлены результаты анализа распространения разных помеховых сигналов в полосковых устройствах с модальным разложением за счёт их моделирования разными подходами. Выполнен анализ распространения воздействий СШП генераторов в витке МЛ и показано ослабление воздействия генератора СИНУС-160 до 3,45 раза. В результате моделирования разными подходами выявлено различие до 18% по амплитуде составляющих отклика на воздействие сверхкоротким импульсом (СКИ) на выходе МЛ из двух витков. В результате анализа распространения СКИ в витке МЛ и МФ с асимметричным поперечным сечением показано, что из-за более сильной связи и вдвое большей длины проводника витка МЛ, затухающая синусоида и синусоида с гауссовой модуляцией частично разлагаются на составляющие, а в МФ – нет.

В разделе 2.3 оценены влияния потерь в проводниках и диэлектрике витка МЛ на распространение помеховых воздействий. Сначала на примере СКИ выявлено, что из-за потерь в проводниках и диэлектрике может рассеиваться до 21% мощности. Затем получены частотные зависимости мощности рассеяния гауссова импульса в витке МЛ, как из-за общих потерь, так и каждого из видов потерь в отдельности. Выявлено, что в области высоких частот из-за потерь в витке МЛ может рассеиваться до 80% мощности сигнала, что может быть использовано для ослабления высокочастотных помеховых сигналов.

3. Способы совершенствования полосковых устройств защиты на основе витка меандровой линии

В разделе 3.1 выполнен анализ возможности трассировки витка МЛ (рисунок 3.1) в виде меандра со слабой связью между полувитками. Выполнена оптимизация параметров его размещения на площади печатной платы $80 \times 80 \text{ мм}^2$. Ограничения размеров связаны с тем, что такие размеры витка дают возможность оценки излучаемых помехоэмиссий в ТЕМ-камере.

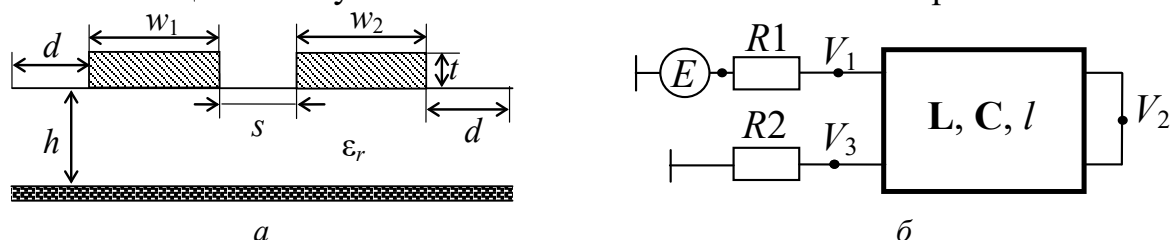


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) витка МЛ на основе МПЛ

В качестве материала печатной платы выбран материал Rogers 4003С с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=3,38\pm 0,05$ на частоте 10 ГГц (при $T=23^\circ\text{C}$) с толщинами основы $h=0,508$ мм и фольги $t=35$ мкм. В результате оптимизации витка по критерию разложения СКИ длительностью 1 нс выбраны: $w_1=w_2=0,3$ мм, $s=0,1$ мм. Их совокупность дает $(Z_e Z_o)^{0,5}=77,9$ Ом и погонные задержки мод $\tau_e=5,41$ нс/м и $\tau_o=4,81$ нс/м, что при длине витка $l=1$ м позволяет разложить импульс длительностью 1,2 нс. Формы напряжения в узлах $V1$ и $V3$ без учёта потерь при $R1=R2=50$ Ом показаны на рисунке 3.2. На выходе наблюдается последовательность из 3 основных импульсов.

Для размещения витка длиной 1 м на плате размерами 80×80 мм² нужно виток МЛ с сильной связью между полувитками свернуть в меандр из N полувитков со слабой связью для минимизации влияния перекрестных связей. Поперечное сечение структуры показано на рисунке 3.3.

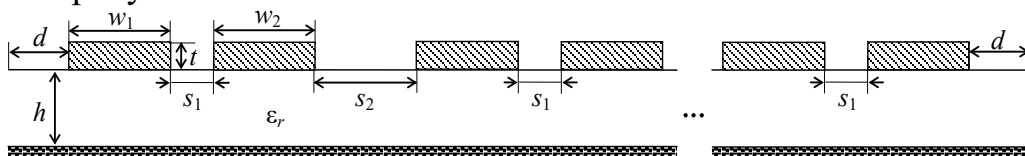


Рисунок 3.3 – Поперечное сечение витка с трассировкой в виде меандра со слабой связью между неосновными полувитками (s_1 – расстояние между проводниками исходного витка, s_2 – расстояние между неосновными полувитками меандра)

Предложенная трассировка позволяет свернуть исходный виток с сильной связью в 19 полувитков со слабой связью и длиной 65,86 мм без учета перемычек при $s_2=10w$ (с коэффициентом электромагнитной связи $k=0,011$). Это даёт общую длину сигнального проводника витка 2502,68 мм (рисунок 3.4). На рисунке 3.5 показаны формы выходного напряжения с учётом потерь при воздействии импульсом длительностью 900 пс.

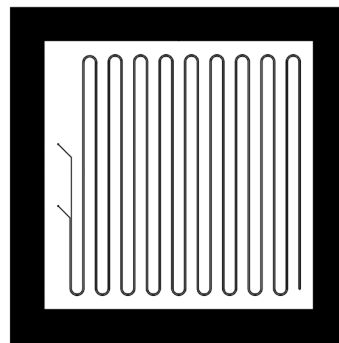
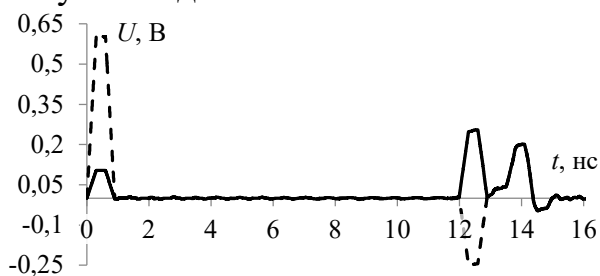
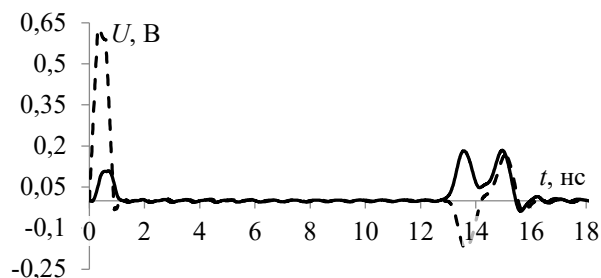


Рисунок 3.4 – Вид сверху модели витка из 19 полувитков на плате 100×100 мм²



a



б

Рисунок 3.5 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) витка по результатам квазистатического (*a*) и электродинамического (*б*) моделирования

Из рисунка 3.5 видно, что формы напряжения согласуются: воздействие на выходе свернутого витка представлено тремя составляющими: перекрёстной

помехи, нечетной и четной мод (как и в исходном витке). Ослабление составило 2,36 и 3,26 раза по результатам квазистатического и электродинамического моделирования соответственно. Разнополярные отражения малой амплитуды приходят между перекрестной помехой и нечётной модой. Отличие форм напряжения, полученных разными подходами, обусловлено различием методов в их основе. Несмотря на это, согласованность результатов приемлема.

Таким образом, совокупность и сходимость результатов моделирования подтверждают возможность сворачивания витка МЛ в меандр со слабой связью между полувитками для его размещения на заданной площади печатной платы.

В разделе 3.2 исследована возможность уменьшения площади витка МЛ с трассировкой в виде меандра за счёт добавления дополнительных, заземленных на концах, проводников между неосновными полувитками. Это дополнительно уменьшает связь между ними и позволяет минимизировать ширину структуры. Поперечное сечение витка МЛ из п. 3.1 (рисунок 3.3а) модифицировано за счёт дополнительных проводников (рисунок 3.6, где w_2 – ширина дополнительного проводника, а s_2 – расстояние между ним и соседним проводником). Модель и поперечное сечение модифицированного витка показаны на рисунке 3.6.

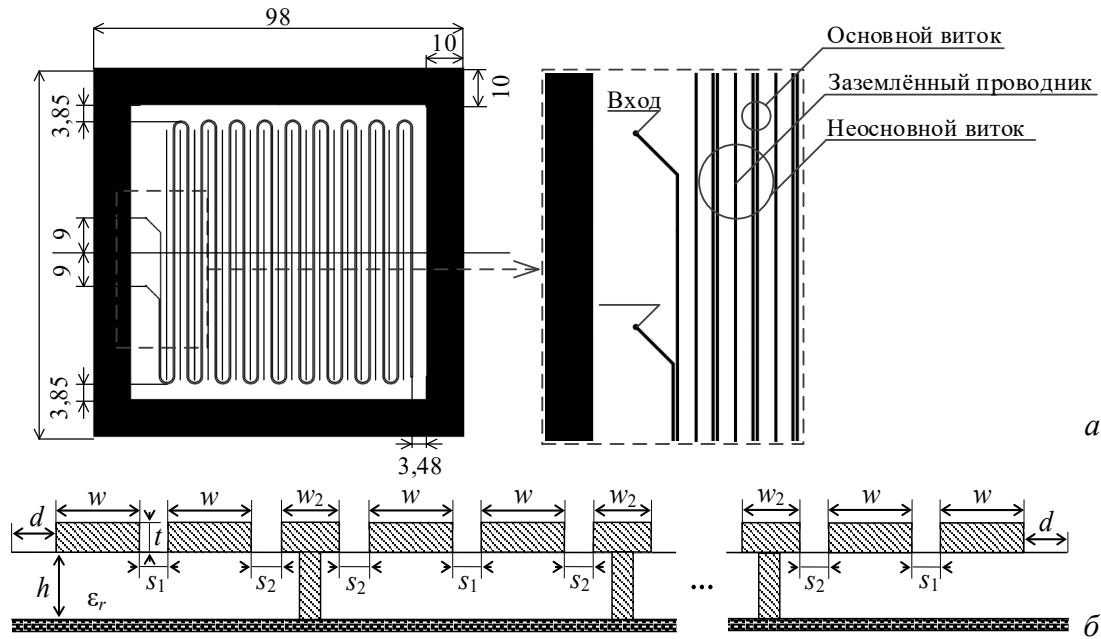


Рисунок 3.6 – Модель (а) и пример поперечного сечения (б) витка, свернутого в меандр с дополнительными заземленными проводниками

Оценены коэффициенты K_C и K_L между ближними (от дополнительного проводника) проводниками витка. Рассмотрено 10 наборов w_2 и s_2 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Наборы параметров дополнительного проводника

№ набора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
w_2 , мкм	300					100				
s_2 , мкм	1200	900	600	300	100	1200	900	600	300	100

Коэффициенты K_C и K_L для каждого набора сведены в таблицу 3.2. Из нее видно, что для $w_2=300$ мкм при уменьшении s_2 от 1600 до 100 мкм коэффициент K_C возрастает в 7,65 раза, а K_L – в 2,5 раза. Для $w_2=100$ мкм увеличение K_C составило 17,9 раза, а K_L – 5 раз. При этом уменьшение w_2 от 300 до 100 мкм

для $w_2=1600$ мкм приводит к увеличению K_C в 1,27 раза, а K_L – в 1,21 раза. При $w_2=100$ мкм увеличение K_C составило 2,96 раза, а K_L в 2,12 раза.

Таблица 3.2 – Вычисленные значения коэффициентов K_C и K_L

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_C	0,0026	0,0039	0,0064	0,0118	0,0199	0,0033	0,0053	0,0103	0,0261	0,0591
K_L	0,0171	0,0228	0,0311	0,0427	0,0496	0,0207	0,0292	0,0435	0,0714	0,1051

С точки зрения минимальных K_C и K_L предпочтительны наборы 1–3 и 6–8, уменьшение ширины витка для которых составит 5,4, 16,2 и 27 мм и 9, 19,8 и 30,6 мм соответственно. Вычисленные формы напряжения для наборов 1–3 и 6–8 представлены на рисунке 3.7 (воздействие то же, что в п. 3.1).

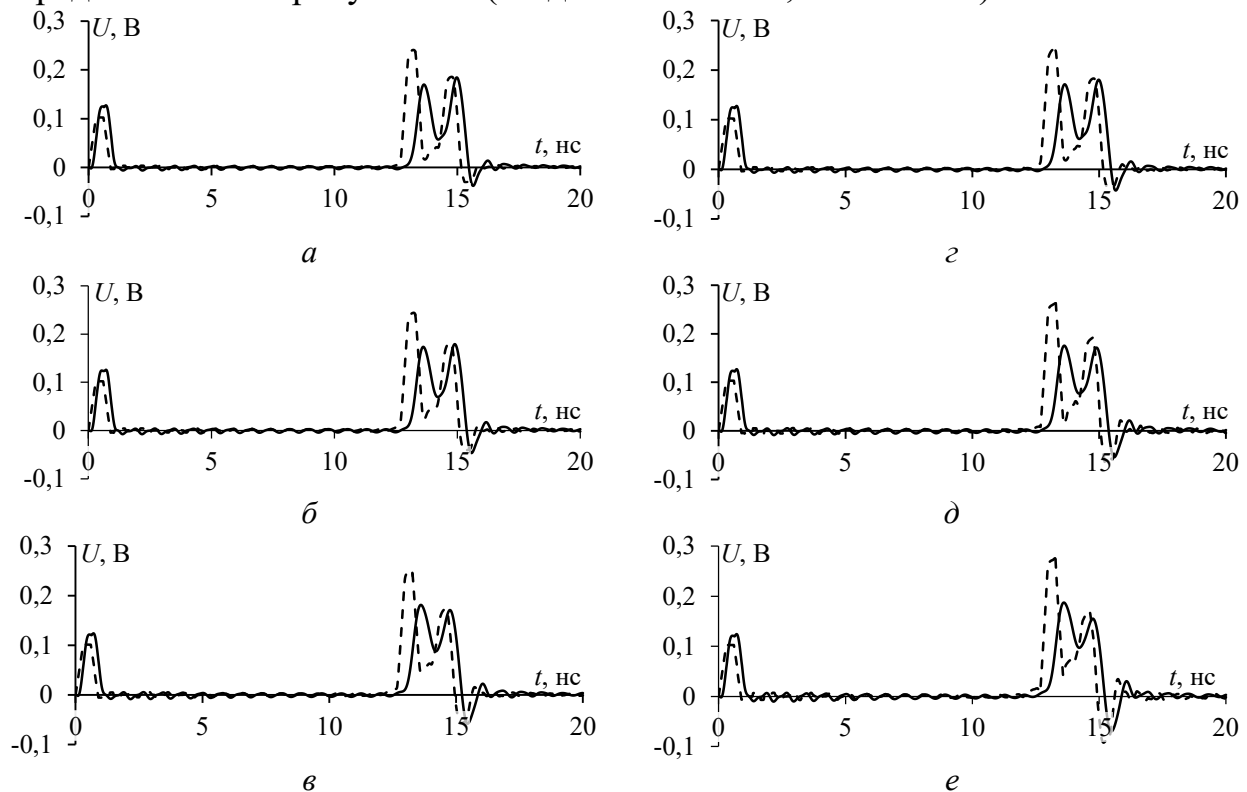


Рисунок 3.7 – Формы напряжения на выходе МЛ, полученные в результате квазистатического (---) и электродинамического (—) моделирования для наборов 1–3 (а–в) и 6–8 (г–е)

Из рисунка 3.7 видно, что амплитуда импульса перекрестной помехи при электродинамическом моделировании выше в среднем на 15–20%. Одной из возможных причин является более строгий учет связи между проводниками. Увеличение времени прихода составляющих при электродинамическом моделировании вызвано наличием проводных отводов у модели. Из результатов на рисунке 3.6 видно, что уменьшение s_2 ведет к уменьшению разности задержек мод и амплитуды чётной моды. Результаты полноволнового анализа говорят о большем ослаблении амплитуды импульсного воздействия на практике из-за потерь и дисперсии.

Таким образом, совокупность и сходимость результатов моделирования разными подходами подтверждают возможность применения дополнительных заземленных проводников для уменьшения размеров витка МЛ на плате. На рассмотренном примере показано уменьшение ширины витка МЛ на 45%.

В разделе 3.3 оценена возможность дополнительного ослабления СКИ в витке МЛ с асимметричным поперечным сечением. Для проектирования таких устройств предложена методика. Её апробация выполнена на примере витка МЛ с боковой и лицевой связями. В качестве основы платы выбран материал Arlon AD1000 с толщинами основы $h=0,508$ мм и фольги $t=18$ мкм и $\epsilon_r=10,2\pm 0,35$.

В результате оптимизации получены 2 набора параметров витка с боковой связью (рисунок 3.1). Для набора 1 параметры следующие: $w_1=0,5$ мм, $w_2=1$ мм, $s=0,6$ мм, $l=1209$ мм. Для набора 2 $w_2=1$ мм, а $l=749,5$ мм. Формы напряжения на выходе витков, полученные аналитически и численно двумя подходами на воздействие длительностью 900 пс, показаны на рисунке 3.8.

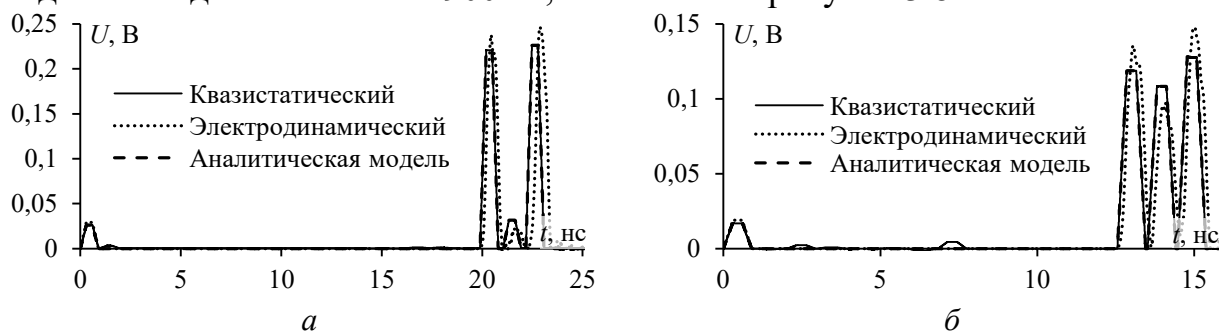


Рисунок 3.8 – Формы напряжения на выходе витка, вычисленные разными подходами, для наборов 1 (а) и 2 (б)

Из рисунка 3.8 видно, что полученные формы напряжения для наборов 1 и 2 согласуются, но наблюдаются отличия результатов электродинамического моделирования от остальных. Также видно, что усиление асимметрии привело к увеличению в 4,6 раза амплитуды дополнительного импульса и уменьшению амплитуд импульсов мод. Это позволило увеличить ослабление воздействия с 2,8 до 4,2 раза (по результатам электродинамического анализа).

Для размещения витка с набором параметров 1 на площади $S=80\times 80$ мм² сформирован меандр из 17 полувитков, а для набора 2 – из 11 (рисунок 3.9а, б). Вычисленные разными методами формы выходного напряжения показаны на рисунке 3.9 (в – для набора 1, г – для набора 2). Поперечное сечение свернутого витка такое же, как на рисунке 3.3 при $w_1\neq w_2$.

Из рисунка 3.9 видно, что между импульсами перекрестной помехи и нечётной мод наблюдаются искажения, вызванные отражениями сигнала от перемычек. Из-за них также искажен импульс перекрестной помехи. Отметим, что результаты моделирования разными подходами согласуются, однако для набора 1 согласование лучше как по амплитуде, так и по задержке импульсов, а для набора 2 более существенные различия могут быть вызваны влиянием отражений. Для наборов 1 и 2 различие задержек не превышает 3,7 и 11,1%, а амплитуд – 8 и 22% соответственно. На следующем этапе выполнена оценка характеристик воздействия до и после его разложения в витке с помощью N -норм. Результаты их расчёта сведены в таблицу 3.4. Из неё видно, что нормы, вычисленные для формы напряжения, полученной разными методами, хорошо согласуются. Уменьшение N_1 за счёт увеличения асимметрии по результатам электродинамического моделирования составило 1,57 раза (за счёт увеличения амплитуды дополнительного импульса и уменьшения общего уровня сигнала).

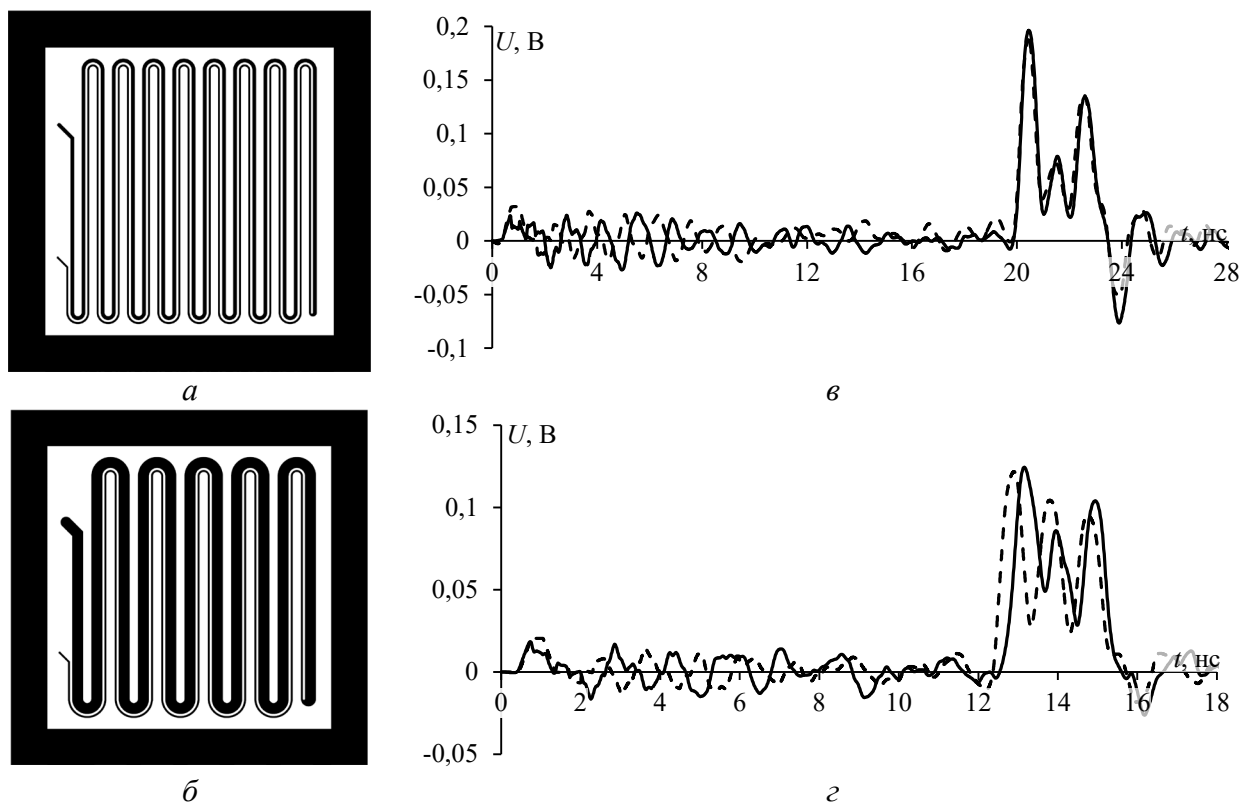


Рисунок 3.9 – Модели свернутого витка для наборов 1 (а) и 2 (б) и соответствующие им формы выходного напряжения (в, з), полученные в результате моделирования квазистатическим (- -) и электродинамическим (—) подходами

Таблица 3.4 – Вычисленные нормы для наборов параметров 1 и 2

Набор	Подход	N_1	$N_2 \times 10^{-9}$	$N_3 \times 10^{10}$	$N_4 \times 10^{10}$	$N_5 \times 10^6$
	Исходное воздействие	0,5	1,83	3,13	3,13	11,2
1	Квазистатический	0,19	0,53	3,82	5,4	5,97
	Электродинамический	0,196	0,556	3,018	5,662	6,106
2	Квазистатический	0,13	0,37	2,25	3,23	4,27
	Электродинамический	0,125	0,34	2,668	4,081	4,338

Таким образом, совокупность и сходимость результатов моделирования подтверждают возможность дополнительного ослабления СШП помех в витке МЛ за счёт увеличения асимметрии поперечного сечения. На рассмотренном примере показано дополнительное ослабление сигнала в 1,57 раза.

4. Способы совершенствования полосковых устройств защиты на основе витка меандровой линии

В разделе 4.1 приведены методики измерения характеристик прототипов разработанных устройств на основе витка МЛ во временной и частотной областях на базе векторного анализатора цепей (ВАЦ) и ТЕМ-камеры.

В разделе 4.2 представлены результаты измерений характеристик витка с симметричным поперечным сечением. Для его прототипирования использован материал Rogers 4003 С толщиной 0,508 мм, $\epsilon_r=3,38 \pm 0,05$ и $\tan \delta=0,0027$ на частоте 10 ГГц. Остальные параметры такие же, как в п. 3.1. Общий вид и вид сбоку прототипа витка с подключенными кабельными сборками показаны на рисунке 4.1а, б. Измерения выполнены на базе ВАЦ Rohde&Schwarz ZNB 20. Перед этим проведена его TOSM-калибровка. Измеренные S-параметры в

диапазоне до 1 ГГц и временной отклик, полученный на их основе в системе ADS и электродинамическим подходом, на воздействие длительностью 900 пс показаны на рисунке 4.1*в, г*. Выявлена разница задержек импульсов: для импульса перекрестной помехи она составила 0,69 и 1,1 нс по результатам вычисления и измерений соответственно. Эта разница вызвана задержкой в кабельных сборках, коаксиальных переходах и SMA-соединителях. Её учёт выполнен сдвигом отклика на минус 363 пс.

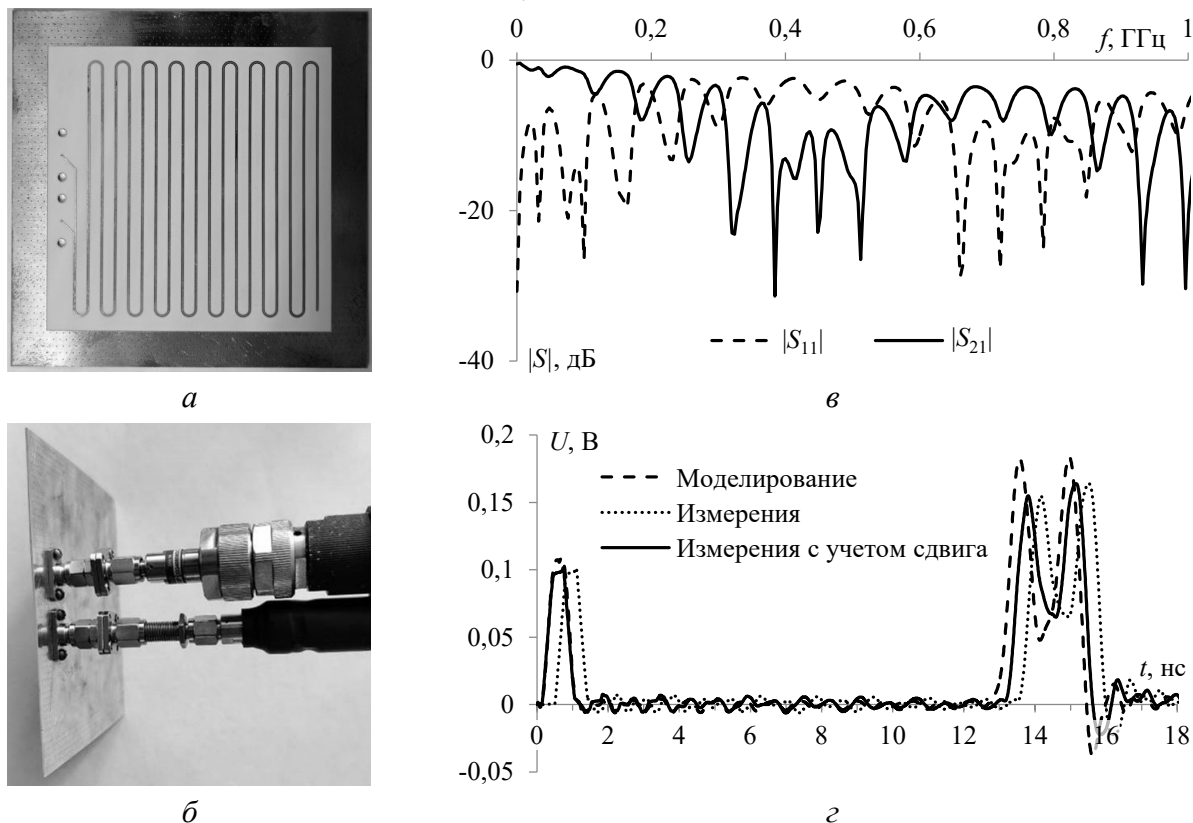


Рисунок 4.1 – Вид сверху (*а*) и сбоку с подключенными кабельными сборками (*б*) прототипа, его S -параметры (*в*) и форма выходного напряжения (*г*), полученные разными методами

Из рисунка 4.1*г* видно, что формы выходного напряжения, полученные разными методами, согласуются. Наибольшая разница задержек (около 0,2 нс) и амплитуд (около 30 мВ) у импульса нечётной моды. Ослабление воздействия по результатам измерений составило 3,65 раза. Несмотря на выявленные различия, согласованность результатов измерений с другими подтверждает возможность трассировки витка МЛ в виде меандра со слабой связью между неосновными полувитками и уменьшением занимаемой площади.

Отдельно выполнены измерения на базе комбинированного осциллографа С9-11 во временной области. При измерениях прототип помещен в uTEM-камеру для его фиксации и экранирования от внешних воздействий. В качестве воздействий приняты нормированные по максимальному уровню импульсы с выхода генератора осциллографа с длительностью 885 и 287 пс по уровню 0,5 от амплитуды. Коаксиальные переходы и кабельные сборки вносят задержку около 320 пс, которая учтена при обработке результатов измерений. На рисунке 4.2 показаны формы напряжения на выходе прототипа, полученные в результате электродинамического моделирования и измерений.

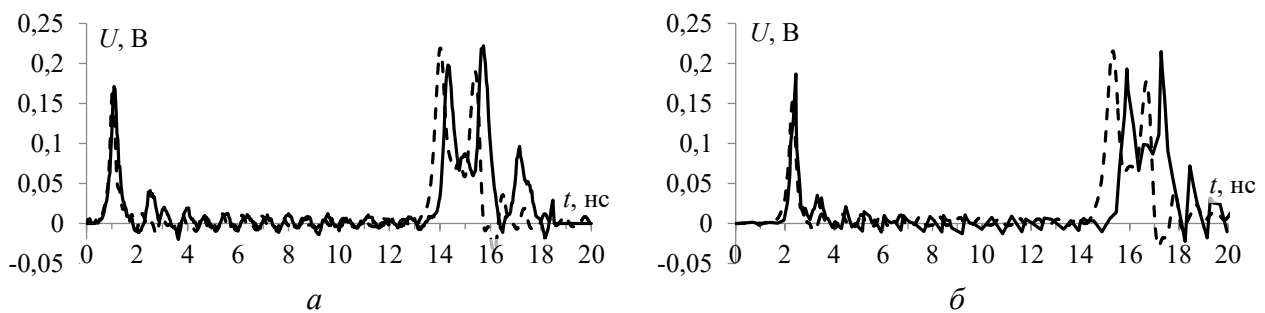


Рисунок 4.2 – Формы напряжения на выходе прототипа по результатам вычислений (---) и измерений (—) при воздействиях с длительностями 885 (а) и 287 (б) пс

Из рисунка 4.2а виден разный характер искажения основных импульсов: при моделировании амплитуда нечётной моды выше амплитуды чётной, а при измерениях наоборот (что также согласуется с результатами на рисунке 4.1). Между тем это практически не оказывает влияния на общий уровень выходного сигнала. Из рисунка 4.2б видно, что результаты согласуются хуже: различие амплитуд и задержек выше, чем на рисунке 4.2а. Это может быть вызвано более существенным влиянием отражений, потерь и дисперсии на более короткое воздействие. Нужно отметить рост амплитуды перекрестной помехи на 35 мВ. Кроме этих результатов, оценены излучаемые помехоэмиссии прототипа в ТЕМ-камере, но они не приведены из-за объема автореферата.

Таким образом, совокупность результатов моделирования п. 3.1 и их согласованность с измерениями подтверждают применимость трассировки витка в виде меандра для уменьшения занимаемой площади с сохранением ослабления импульсных СШП воздействий. На рассмотренном примере показано, что предложенный способ позволяет разместить виток длиной 1325,3 мм и шириной 3,7 мм на площади $67,3 \times 70,3 \text{ мм}^2$ с сохранением (даже увеличением из-за реального влияния потерь и дисперсии) ослабления.

В разделе 4.3 представлены результаты экспериментальных исследований для оценки возможности дополнительного уменьшения занимаемой витком МЛ площади за счёт дополнительных заземленных проводников. Прототипирование выполнено на основе материала Arlon AD1000 с $h=0,508 \text{ мм}$, $t=18 \text{ мкм}$, $\epsilon_r=10,2$ и $\tan\delta=0,0023$ при $f=20 \text{ ГГц}$. Параметры исходного витка на рисунке 3.3 (далее прототип 1): $w_1=w_2=0,3 \text{ мм}$, $s_1=0,2 \text{ мм}$, $s_2=10w$. Они дают его согласование с трактом 50 Ом. Длина сигнального проводника выбрана $l_1=2505 \text{ мм}$. Параметры модифицированного витка на рисунке 3.5 (прототип 2): $w=0,3 \text{ мм}$, $w_2=0,3 \text{ мм}$, $s_1=0,2 \text{ мм}$, $s_2=0,9 \text{ мм}$. Они обеспечивают общую длину проводника $l_2=3255 \text{ мм}$ на заданной площади. Введение дополнительных проводников дало уменьшение электромагнитной связи между неосновными полувитками в 1,6 раза. Вид прототипа 1 соответствует рисунку 3.4, а прототипа 2 – рисунку 3.6 а. Виды изготовленных прототипов здесь не приведены с целью экономии места.

Измерение частотных зависимостей S -параметров прототипов выполнено с помощью ВАЦ Agilent Technologies E50771 C (рисунок 4.3а). На основе измеренных S -параметров и в результате электродинамического моделирования получены формы выходного напряжения прототипов при воздействии импульсом длительностью 900 пс (рисунок 4.3б). Оценены излучаемые помехоэмиссии прототипа в ТЕМ-камере, но они не приведены из соображений экономии места.

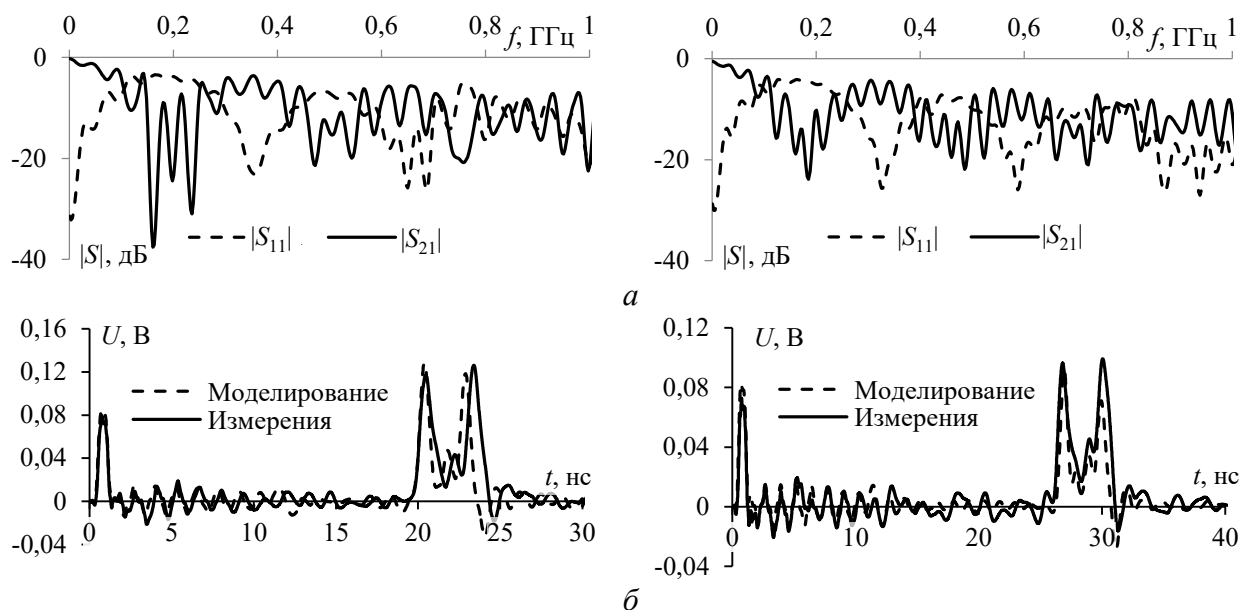


Рисунок 4.3 – Измеренные S -параметры (а) и соответствующие им формы напряжения (б) на выходе прототипов 1 (справа) и 2 (слева)

Из представленных форм напряжения видно, что они хорошо согласуются. Между импульсами мод (импульсы 2 и 3) наблюдается импульс, являющийся результатом наложения отраженных составляющих на фронт и спад импульсов мод. Ослабление на выходе прототипов определяется амплитудой чётной моды (импульса 3) и для прототипов 1 и 2 составляет 3,97 и 5 раз соответственно. Таким образом, добавление дополнительных проводников в структуру приводит к увеличению ослабления в 1,26 раза по сравнению с исходной структурой. Из-за увеличения длины проводника увеличиваются задержки мод, а также потери.

Для оценки угроз вычислены N -нормы воздействия на входе и результата его разложения на выходе прототипов по результатам измерений (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – 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
На выходе прототипа 1	0,126	0,403	3,16	4,50	4,96
На выходе прототипа 2	0,099	0,330	2,98	4,82	4,50

Результаты таблицы 4.1 подтверждают сделанные ранее выводы. Видно, что N_1 , по сравнению с воздействием на входе прототипов, уменьшается в 3,97 и 5 раз на выходе прототипов 1 и 2 соответственно. Уменьшение N_2 также довольно существенное: 4,54 и 5,54 раза для прототипов 1 и 2 соответственно. Уменьшение N_2 на выходе прототипа 2 объяснимо более пологими фронтами составляющих. Рост N_3 и N_4 вызван появлением большого количества отражений и сглаживанием составляющих из-за потерь, что также слабо уменьшает N_5 .

Таким образом, выявлено, что добавление дополнительных проводников в структуру увеличивает ослабление в 1,3 раза относительно исходной структуры. На это также влияют потери в проводниках и диэлектриках за счёт увеличения общей длины сигнального проводника. Результаты позволяют утверждать, что дополнительные проводники позволяют уменьшить размеры устройства с приемлемым сохранением защитных характеристик (либо увеличения его длину).

В разделе 4.4 выполнено измерение характеристик прототипов витка с асимметричным поперечным сечением для подтверждения выявленных в п. 3.3 закономерностей подавления импульсного СШП воздействия. Изготовлены прототипы витка на основе того же материала, что и в п. 4.2. Параметры их поперечных сечений такие же, как в п. 3.3. Для простоты витки для наборов параметров 1 и 2 будут называться здесь прототипами 1 и 2. Вид прототипов сверху соответствует моделям на рисунке 3.9. Измерение S -параметров выполнено на базе ВАЦ Agilent Technologies E5071C.

Сначала измерены S -параметры прототипов (рисунок 4.4а), а также оценены их излучаемые помехоэмиссии и восприимчивость. Полученные формы выходного напряжения в результате моделирования электродинамическим подходом и измерений на основе S -параметров при воздействии импульсом в виде трапеции длительностью 900 пс показаны на рисунке 4.4б.

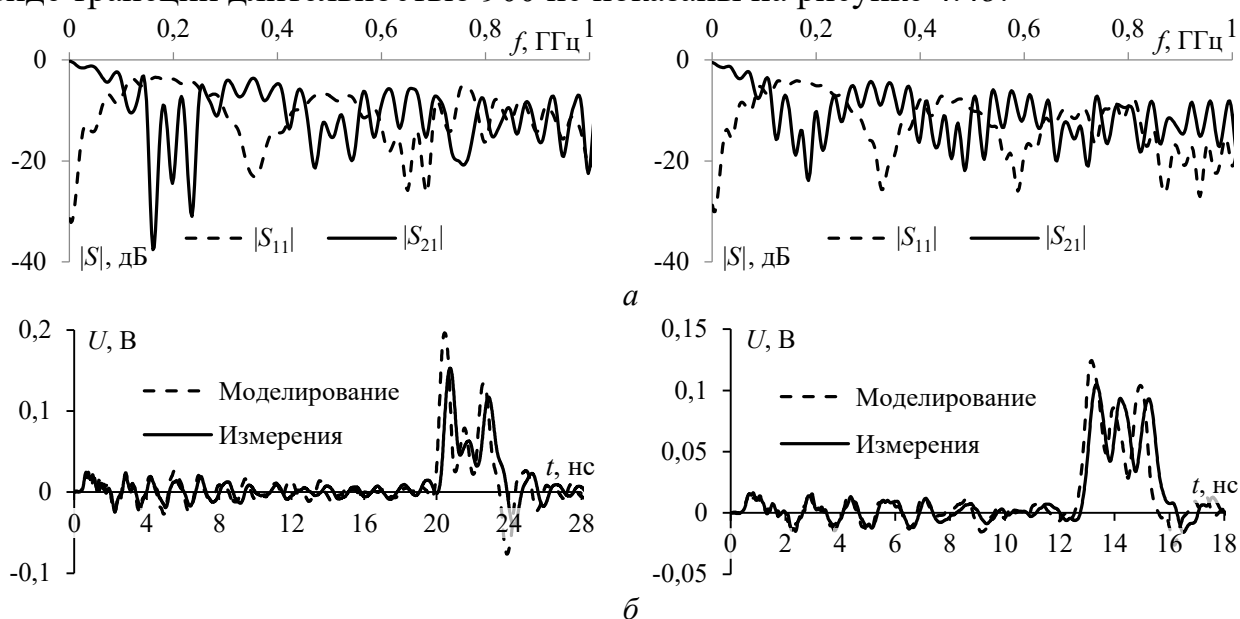


Рисунок 4.4 – Измеренные S -параметры (а) и соответствующие им формы напряжения (б) на выходе прототипов 1 (слева) и 2 (справа)

Из полученных результатов видно, что формы напряжения, полученные разными методами, согласуются по форме, амплитуде и задержке составляющих. Между тем для прототипа 1 это согласование лучше, как по их амплитуде, так и по задержке, а для прототипа 2 различия больше. При увеличении асимметрии амплитуда дополнительного импульса возрастает, что частично выравнивает амплитуды составляющих и уменьшает общий уровень выходного сигнала в прототипе 2. Это подтверждает выводы о влиянии асимметрии поперечного сечения витка, сделанные в п. 3.3. Выполнена оценка N -норм воздействия до и после его разложения (таблица 4.2). Из неё видно, что нормы, вычисленные на основе результатов, полученных разными методами, согласуются. Наибольшее уменьшение N_1 (до 5 раз) получено для прототипа 2 из-за меньшего уровня выходного сигнала за счёт увеличения амплитуды дополнительного импульса. Кроме того, заметно уменьшение N_2 (до 6,6 раз) и N_5 , однако существенного уменьшения N_3 не выявлено, а N_4 может быть даже больше, чем у воздействия. Это связано со сглаживанием формы составляющих из-за потерь. Ослабление на выходе прототипов 1 и 2 составило 3,27 и 4,77 раза соответственно.

Таблица 4.1 – N -нормы при воздействии импульсом в виде трапеции

Источник	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	3,0	3,0	11,2
Прототип 1					
Моделирование	0,196	0,556	3,018	5,662	6,106
Измерения	0,153	0,396	2,803	4,810	5,106
Прототип 2					
Моделирование	0,125	0,34	2,668	4,081	4,338
Измерения	0,105	0,276	2,668	3,925	4,108

Таким образом, за счёт измерений доказано, что увеличение асимметрии поперечного сечения витка МЛ приводит к росту ослабления импульсных СШП воздействий. Получен рост ослабления в 1,46 раза.

В разделе 4.5 сравнены разработанные прототипы витка МЛ. Также сравнены характеристики наиболее эффективного (по ослаблению) прототипа витка МЛ с модальными фильтрами и с LC-фильтрами с сосредоточенными и распределенными параметрами. Выявлено, что виток МЛ обеспечивает лучшее подавление воздействий в виде трапеции с длительностями 900, 300, 60 пс по сравнению с другими. Качественный анализ полученных на их выход форм напряжения согласуется с оценками по N -нормам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования

1. Выявлено существенное (до 12% по амплитуде составляющих) влияние количества ячеек дискретизации витка МЛ на результаты электродинамического моделирования временного отклика.

2. Анализ распространения воздействий реальных СШП генераторов в витке МЛ на основе МПЛ выявил возможность ослабления до 3,45 раза импульса с генератора СИНУС-160.

3. Подтверждена возможность разложения СКИ в МЛ из двух витков с помощью электродинамического моделирования.

4. Моделирование распространения типовых воздействий в витке МЛ и МФ с асимметричным поперечным сечением выявило, что даже без учёта потерь в проводниках и диэлектрике результаты, полученные разными подходами, различны из-за влияния потерь на излучение, которые всегда учитываются при электродинамическом моделировании.

5. Анализ рассеяния мощности СКИ во временной области выявил, что из-за потерь в проводниках и диэлектрике витка МЛ может рассеиваться до 21% мощности. На высоких частотах выявлено рассеяние до 80% мощности.

6. Предложена трассировка витка на заданной площади печатной платы в виде меандра со слабой связью между неосновными полувитками. Выявлены совпадение результатов моделирования разными подходами и измерениями. Показана возможность трассировки витка длиной 1325,3 мм и шириной 3,7 мм на площади $67,3 \times 70,3 \text{ мм}^2$ и ослаблением до 3,6 раза.

7. Разработан подход к дополнительному уменьшению размеров витка МЛ за счёт дополнительных заземленных проводников между неосновными

полувитками для уменьшения электромагнитной связи полувитков. В посредством моделирования показана возможность уменьшения на 45% ширины витка (по сравнению с исходной). Уменьшение расстояния между неосновными витками с 3 до 2,1 мм за счёт дополнительных проводников позволило увеличить длину сигнального проводника витка с 2505 до 3255 мм. Ослабление импульсного воздействия увеличилось в 1,3 раза по сравнению со структурой без заземленных проводников.

8. Показана возможность увеличения ослабления амплитуды импульсного воздействия за счёт увеличения асимметрии поперечного сечения витка МЛ. За счёт моделирования разными подходами выявлено, что увеличение асимметрии позволяет увеличить ослабление в 1,5 раза. Посредством измерения прототипов устройств доказан рост ослабления в 1,45 раза при импульсном воздействии.

9. Анализ частотных и временных характеристик, в том числе с вычислением N -норм, выявил что виток МЛ может обеспечить лучшее подавление ЭМВ, чем МФ и LC-фильтрами, рассмотренными в работе.

Рекомендации

1. Способы модификации полосковых устройств на основе витка МЛ могут применяться для проектирования таких устройств и защиты РЭС от импульсных СШП воздействий.

2. Результаты могут использоваться для дальнейших исследований и разработки методик проектирования полосковых устройств, основанных на модальном разложении.

3. Результаты анализа распространения помеховых воздействий разной формы в полосковых устройствах с модальным разложением могут быть использованы в образовательном процессе высших учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Экспериментальное подтверждение защиты РЭС от импульсных СШП воздействий высокой мощности с помощью разработанных способов.

2. Экспериментальное исследование возможности выравнивания амплитуд составляющих отклика на выходе витка МЛ с лицевой связью и двумя опорными проводниками.

3. Проектирование и исследование полосковых устройств, на уровне печатных плат и/или отдельно с применением предложенных способов их совершенствования, для защиты реальных элементов и устройств РЭС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

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 синтеза пассивных полосковых устройств защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением / С. Карри, З.М. Кенжегулова,

Р.С. Суровцев // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 1. – С. 90–109.

3. **Карри С.** Экспериментальное исследование полосковых устройств защиты с модальным разложением / С. Карри, З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев // Системы управления, связи и безопасности. 2023. – № 3. – С. 1–28.

4. **Карри С.** Экспериментальное исследование характеристик прототипа полоскового устройства защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии / С. Карри, Р.С. Суровцев // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26. №2. – С. 14–20.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

5. **Karri S.** Propagation of pulse signals in the turn of a meander microstrip delay line / S. Karri, Surovtsev R.S., Nosov A.V. // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Tomsk, 21–27 October, 2019. – P 254–257.

6. **Karri S.** Analysis of power dissipation in a turn of a meander microstrip line / S. Karri, Surovtsev R.S. // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics-2021). Omsk, 17–19 November, 2021. – P.1–5.

7. **Kenzhegulova Z.M.** Propagation of interferences in asymmetric strip structures with modal decomposition / Z.M. Kenzhegulova, R.S. Surovtsev, **S. Karri** // 2023 IEEE 24th international conference of young professionals in electron devices and materials (EDM). Erlagol, June 9 – July 3, 2023. – P. 380–385.

Доклады в трудах отечественных конференций

8. **Карри С.** Обзор методов и подходов к оценке потерь на излучение в полосковых линиях / С. Карри, Р.С. Суровцев // Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018», Томск, 2018. – Т 1. – С. 123–126.

9. **Карри С.** Анализ рассеяния мощности сверхкороткого импульса в витке меандровой линии задержки / С. Карри, Р.С. Суровцев // Материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 28–30 ноября 2018. – Ч. 1. – С. 283–286.

10. **Карри С.** Анализ влияния диэлектрической проницаемости подложки на рассеяние мощности сигнала в меандровой линии / С. Карри, Р.С. Суровцев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 22–24 мая 2019. – Ч. 1. – С. 262–266.

11. **Karri S.** Electrodynamics analysis of the meander delay line with two turns / S. Karri, R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.T. Gazizov // Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 20–22 ноября 2019. – Ч. 2. – С. 232–235.

12. **Карри С.** Анализ влияния количества ячеек дискретизации модели меандровой линии на результаты полноволнового анализа / С. Карри, Р.С. Суровцев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск. 25–27 мая 2020. – Ч. 1. – С. 247–250.

13. **Карри С.** Обзор устройств защиты от электростатического разряда // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 19–21 мая 2021. – Ч. 2. – С. 58–61.

14. Носов А.В. Анализ влияния количества витков со слабой связью на форму напряжения в конце витка защитной меандровой линии / А.В. Носов, **С. Карри**, Р.С. Суровцев // Третья Международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации (Шарыгинские чтения), Томск, 29 сентября–1 октября 2021. – С. 100–106.

15. **Карри С.** Анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса в защитной меандровой линии / С. Карри, Р.С. Суровцев // Материалы докладов XV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 20–22 ноября 2021. – Ч. 2 – С. 59–61.

16. **Карри С.** Влияние учёта перемычек на задержку импульсного сигнала при моделировании витка защитной меандровой линии // Микроэлектроника и информатика-2023. XXX Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Зеленоград, 20–21 апреля 2023. – С. 184.