

На правах рукописи



Сагиева Индира Ериковна

**Стабильность характеристик
модифицированных микрополосковых линий**

Специальность 2.2.14
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск–2021

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, заведующий кафедрой
телевидения и управления, ТУСУР

Официальные оппоненты – **Увайсов Сайгид Увайсович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств ФГБОУ ВО МИРЭА-Российского технологического университета, г. Москва;

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

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

Защита состоится 28 декабря 2021 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/h02ov9yg>

Автореферат разослан ___ ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из важных компонентов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются микрополосковые линии (МПЛ). Их непрерывно модифицируют, поскольку они определяют многие важные характеристики устройств и систем, такие как быстродействие, стабильность и надежность. В настоящее время с ростом требований к характеристикам РЭА возникает необходимость воспроизведения линий со стабильными значениями погонной задержки (τ) и волнового сопротивления (Z), и в целом актуально уменьшение чувствительности электрических характеристик линий к изменению их физических параметров (т.е. геометрических параметров, а также параметров диэлектриков). При этом важен учет влияний температуры, поскольку она является внешним эксплуатационным фактором, меняющим одновременно все физические параметры линий.

Степень разработанности темы

Различные аспекты, связанные со стабильностью характеристик полосковых линий исследовали Р. Bhartia, Е. Bogatin, D.C. Dhubkarya, S.K. Devendra, H.-M. Li, L.G. Maloratsky, С.-Н. Ra, М. Riaziat, Y. Singh, R.S. Tomar, M.K. Hamood, S. Vikram, С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Т.Р. Газизов, Л.Н. Кечиев, В.М. Красноперкин, Е.Ю. Максимов, Н.Д. Малютин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин, А.Н. Сычев. Однако выявлены не все ресурсы для уменьшения чувствительности характеристик линий к изменению их параметров, в частности проявляющиеся при многовариантном квазистатическом анализе и добавлении к обычной МПЛ одного или двух проводников. (Такие линии далее в работе, для краткости, условно называются модифицированными МПЛ.)

Цель работы – использовать многовариантный квазистатический анализ для выявления возможностей уменьшения чувствительности характеристик модифицированных микрополосковых линий к изменению их параметров и температуры. Для её достижения необходимы:

1. Обзор модификаций полосковых линий и подходов к их моделированию.
2. Анализ чувствительности характеристик модифицированных МПЛ.
3. Анализ собственных значений и векторов произведения матриц погонных коэффициентов электромагнитной (L) и электростатической (C) индукции и временного отклика МПЛ с заземленными проводниками.
4. Оценка влияния температуры на характеристики модифицированных МПЛ.
5. Подтверждение достоверности результатов, полученных в п. 2–4.

Научная новизна

1. Получены зависимости погонной задержки и волнового сопротивления различных модифицированных микрополосковых линий от высоты, ширины и разнесения проводников, показывающие возможности уменьшения чувствительности, вплоть до нулевой.

2. Теоретически и экспериментально исследовано распространение импульсного сигнала в микрополосковых линиях с дополнительно введенными одним и двумя проводниками, выявляющее изменения сигнала за счёт различия задержек его поперечных волн.

3. Предложен и экспериментально проверен способ построения модальных фильтров, путем введения в микрополосковую линию одного или двух проводников, заземленных на концах.

4. Теоретически и экспериментально исследованы тепловые свойства погонной задержки, волнового сопротивления и частотных и временных характеристик модифицированных микрополосковых линий.

Теоретическая значимость

1. Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования, в т.ч. многовариантный квазистатический анализ, метод моментов, метод конечных элементов и модифицированный узловый метод.

2. Раскрыты особенности влияния параметров модифицированных МПЛ на погонные задержки мод и отклик на воздействие сверхкороткого импульса (СКИ).

3. Изложен сравнительный анализ МПЛ с одним и двумя дополнительными проводниками, заземлёнными полностью и только на концах.

Практическая значимость

1. Создана система практических рекомендаций (методики, модели, их программная реализация) для оценки чувствительности погонной задержки, волнового сопротивления и характеристик модифицированных МПЛ к изменению их параметров.

2. Результаты использованы при подготовке бакалавров и магистров ТУСУРа, г. Томск, а также школьников, студентов и аспирантов в образовательном центре «Сириус», г. Сочи.

3. Показаны возможности использования исследуемых структур для защиты от СКИ (поданы три заявки на изобретения, на одну из которых получено положительное решение).

Методология и методы исследования. В работе применены математическое моделирование, основанное на методе моментов и методе конечных элементов, многовариантный квазистатический анализ, модальный анализ, модифицированный узловый метод.

Положения, выносимые на защиту

1. Модификации микрополосковых линий и многовариантный анализ погонной задержки и волнового сопротивления позволяют минимизировать, вплоть до нулевой, их чувствительность к изменению отдельных параметров.

2. После введения в микрополосковую линию заземленного на её концах проводника сверху, она характеризуется не одной, а двумя погонными задержками, одна из которых меньше прежней, а вторая больше, причем с ростом высоты проводника и ширины линии разность этих задержек растет, и отклонение от прежней задержки может достигать 50%; последующее разделение этого проводника на два симметричных дает три погонных задержки, первые две из которых меньше прежней, а третья больше, но из-за симметрии проводников нет влияния самой быстрой моды на выходной сигнал, и оно определяется двумя оставшимися, причем с ростом высоты проводников и расстояния между ними разность этих задержек растет, а их отклонения от прежней уменьшаются до 30–10%; с последующим углублением двух симметричных проводников в

диэлектрике увеличение расстояния между ними влияет иначе: разность задержек этих двух мод уменьшается и их отклонения от прежней около 10%.

3. Введение в микрополосковую линию одного или двух проводников, заземленных на её концах, придает ей свойства защиты от сверхкоротких импульсов.

4. Многовариантный квазистатический анализ позволяет выполнить согласованную с экспериментами оценку влияния температуры на характеристики модифицированных микрополосковых линий.

Оригинальные результаты соотносятся с паспортом специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии по п. 3 – Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами.

Достоверность результатов определяется применением теоретически обоснованных численных методов и согласованностью результатов, полученных: двумя методами и четырьмя программами; алгоритмической и аналитической моделями; моделированием и измерениями двумя приборами.

Использование результатов

1. 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.

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

3. 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.

4. 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.

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

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

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

8. НИР «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент», FEWM-2020-0039, 2020–2022 г.

9. Учебный процесс студентов и магистрантов радиотехнического факультета ТУСУРа (есть акт) и школьников, студентов и аспирантов в образовательном центре «Сириус».

Апробация результатов. Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах ФЦП ИР (проект RFMEFI57417X0172), РФФ (грант 19-19-00424), РФФИ (грант 19-37-51017). Результаты докладывались и представлялись в материалах конференций: межд. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», Томск, 2017, 2018 и 2021 гг.; межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 2017 и 2020 гг.; межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс)», Томск, 2017, 2018 и 2020 гг.; научно-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС», Красноярск, 2017 г.; межд. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы радиофизики», Томск, 2017 г.; межд. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», Красноярск, 2018 г.; научн. конф. «Методы вычислений и математическая физика», Сочи, 2020 г.; Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Алтай, 2020 и 2021 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 работ (10 без соавторов), в т.ч. 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале из Q1 WoS и SCOPUS, 2 доклада в журнале, индексируемом в WoS и SCOPUS, 3 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и SCOPUS, 16 докладов в трудах других конференций, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, 5 разделов, заключение, список литературы из 61 наименования, приложение из 12 с. Объем с приложением – 216 с., в т.ч. 202 рисунка и 51 таблицу.

Личный вклад. Непосредственное участие автора в постановке цели и задач исследования. Результаты работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии. Отдельные результаты исследования получены совместно с соавторами публикаций. Обработка и интерпретация результатов выполнены лично автором.

Краткое содержание работы. В разд. 1 выполнен обзор модификаций полосковых линий и подходов к их моделированию. В разд. 2 представлены результаты многовариантного анализа чувствительности характеристик модифицированных МПЛ. В разд. 3 приведен анализ собственных значений и векторов произведения матриц \mathbf{L} и \mathbf{C} и временного отклика МПЛ с заземленными проводниками. В разд. 4 оценено влияние температуры на характеристики модифицированных МПЛ. В разд. 5 подтверждается достоверность результатов. В Приложении А приведены акты внедрения, положительное решение о выдаче патента на изобретение, копии свидетельств и дипломов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор модификаций полосковых линий и подходов к их моделированию

В подразделе 1.1 рассмотрены модифицированные полосковые линии. В подразделе 1.2 рассмотрены подходы к моделированию характеристик полосковых линий (многовариантный квазистатический анализ, метод моментов, модальный анализ, вычисление временного отклика полосковой линии, температурная модель). В подразделе 1.3 сформулированы цель и задачи работы.

2. Анализ чувствительности характеристик модифицированных МПЛ

Различные модификации МПЛ представлены на рисунках 2.1. Для линии из рисунков 2.1 *a* и *б* неизменны толщина полоски $t=18$ мкм, толщина подложки $h=1$ мм и относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=4,5$. Для структур из рисунков 2.1 (*в–ж*) выбраны следующие (близкие к типовым) значения параметров поперечного сечения: ширина сигнального проводника $w=0,3$ мм, $t=18$ мкм, ширина боковых проводников $w1=1$ мм, $h=1$ мм, $\epsilon_r=4,5$.

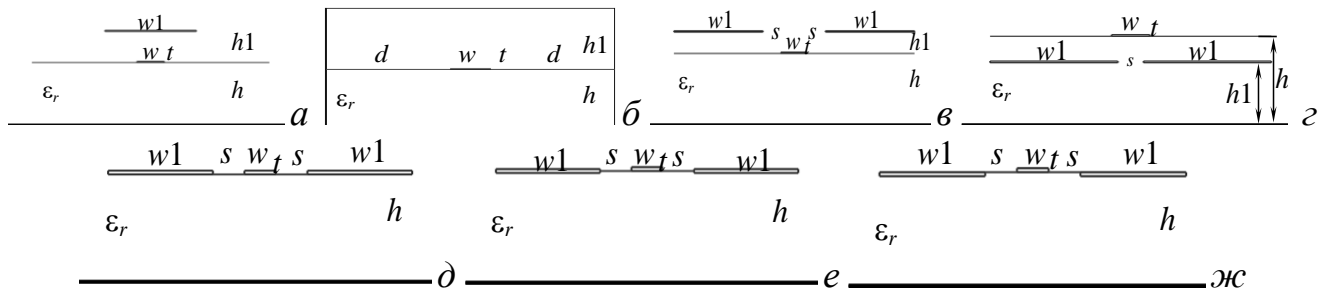


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения МПЛ, покрытой заземленным проводником (*a*), экранированной (*б*), с боковыми заземлёнными проводниками: сверху (*в*) и углубленными в подложку (*г*), над (*д*), посреди (*е*) и под (*ж*) границей воздух–подложка

В подразделе 2.2 представлен анализ чувствительности характеристик покрытой заземленным проводником и экранированной МПЛ, а в подразделе 2.3 – для МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками. Примеры результатов, показывающих возможности уменьшения чувствительности τ и Z , вплоть до нулевой, приведены на рисунке 2.2.

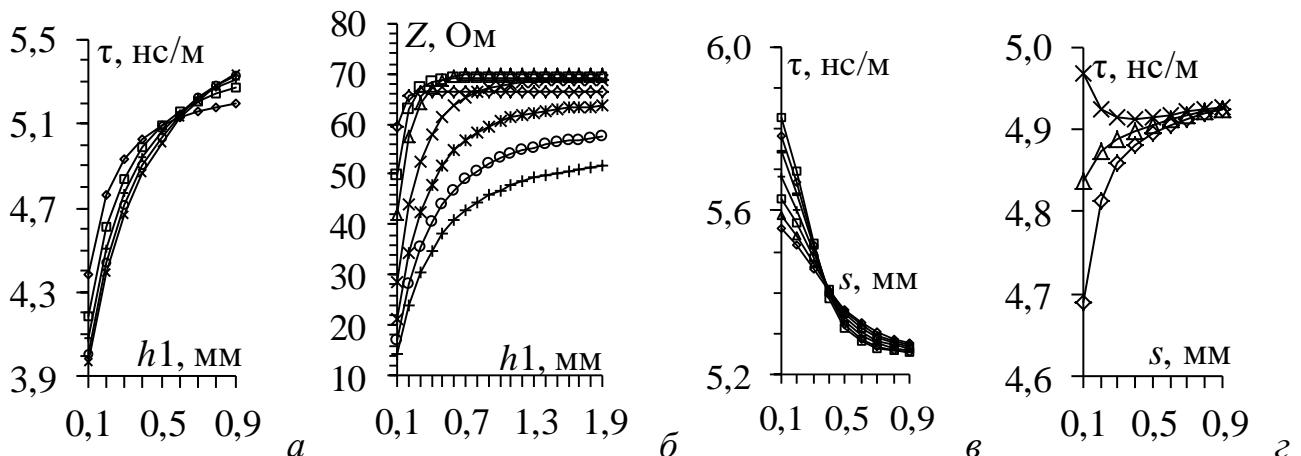


Рисунок 2.2 – Семейства зависимостей $\tau(h1)$ для рисунка 2.1 *a* (*a*), $Z(h1)$ – 2.1 *б* (*б*), $\tau(s)$ – 2.1 *г* (*в*), $\tau(s)$ – 2.1 *г* (*д–ж*)

Значения τ и Z линий из рисунков 2.1 вычислялись как

$$\tau = (C/C_0)^{0,5}/v_0, \quad Z = 1/(v_0(CC_0)^{0,5}), \quad (2.1)$$

где v_0 – скорость света в вакууме, C и C_0 – погонные емкости линии реальной и в вакууме. При этом боковые проводники полагались под нулевым потенциалом.

Таким образом, представлены систематизированные результаты исследования значений τ и Z модифицированных МПЛ. Сравнение МПЛ, покрытой заземленным проводником, и экранированной МПЛ показало, что наличие боковых стенок, за счет увеличения краевых емкостей, позволяет получить нулевую чувствительность в широком диапазоне значений $h1$. На программу для моделирования последней структуры получено свидетельство. Для МПЛ с боковыми заземленными проводниками приближение боковых проводников к границе воздух-подложка оказывает особое влияние на характеристики. В частности, появляется возможность выбором параметров линии получить требуемое значение Z при минимальной чувствительности τ изменению s . Кроме того, выявлена возможность нулевой чувствительности.

3. Анализ собственных значений и векторов произведения матриц L и C и временного отклика МПЛ с заземленными проводниками

В подразделе 3.1 представлены моделируемые схемы, в 3.2 – результаты для МПЛ, покрытой заземленным проводником, а в 3.3 – для МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками. В подразделе 3.4 описаны три заявки на изобретения на МПЛ, защищающие от СКИ. Примеры результатов из подразделов 3.2 и 3.3 приведены на рисунках 3.1 и 3.2 и в таблицах 3.1 и 3.2.

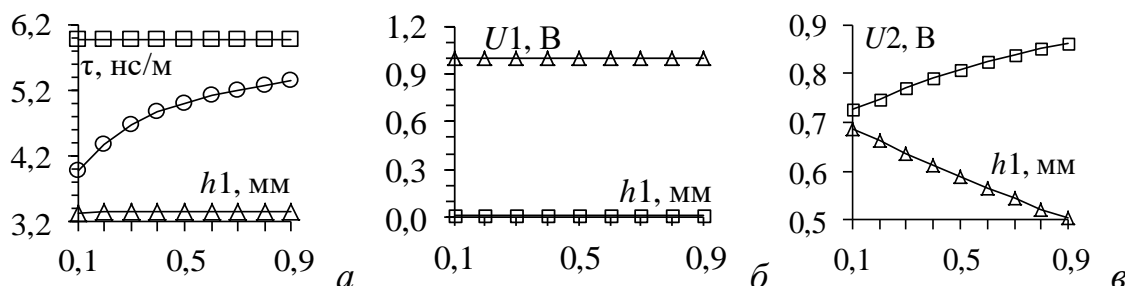


Рисунок 3.1 – Зависимости τ_0 (\circ), τ_1 (Δ) и τ_2 (\square) (a) и элементов собственных векторов напряжения от $h1$ при $w=1,5$ мм для τ_1 (б) и τ_2 (в)

Таблица 3.1 – Отклонения τ при $w=1,5$ мм для МПЛ с проводником сверху

$h1$, мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$(\tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	50	36	27	22	19	16	14	13	11
$(\tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	16	24	28	31	33	35	36	37	37

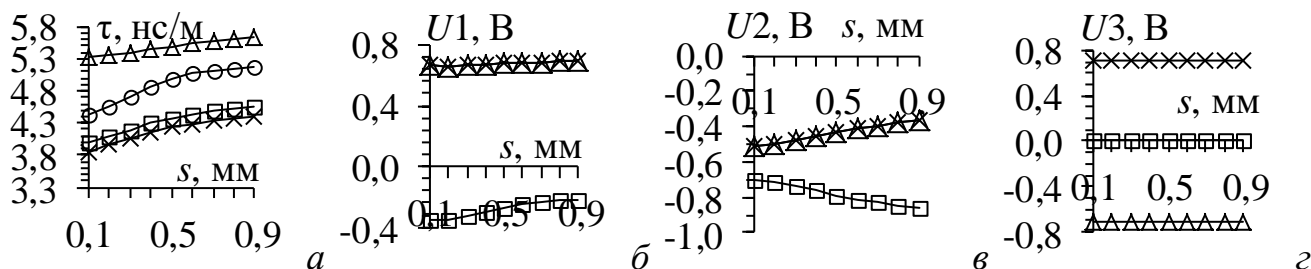


Рисунок 3.2 – Зависимости τ_0 (\circ), τ_1 (\square), τ_2 (Δ) и τ_3 (\times) (a) и элементов собственных векторов напряжения от s при $h1=0,1$ мм для τ_1 (б), τ_2 (в) и τ_3 (г)

Таблица 3.2 – Отклонения τ при $h_1=0,1$ мм для МПЛ с двумя проводниками

s , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$(\tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	18,1	15,9	13	10,3	8,6	7,7	7,2	7,2	7
$(\tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	9,5	10,1	11,1	12,1	12,6	12,8	12,9	12,8	12,7

Основные результаты раздела и выводы

1. МПЛ с одним проводником сверху, заземленным не полностью, а только на концах, характеризуется не одной, а двумя погонными задержками. Одна из них становится меньше прежней, а вторая – больше, что соответствует модам, распространяющимся более в воздухе и диэлектрике. С ростом высоты проводника и ширины МПЛ разность этих задержек растет. Отклонение от прежней задержки достигает 50%. Это может привести к ступенчатым искажениям фронта и спада распространяющегося в линии импульса, вплоть до его разложения на два импульса. Если произведение длины линии на разность погонных задержек меньше длительности воздействующего импульса, оно определяет сдвиг этой ступеньки, а если больше, то оно определяет разность задержек импульсов разложения. Выбором параметров выравниваются амплитуды импульсов разложения и максимизируется интервал между ними, чем достигается большее ослабление вредных импульсов с большей длительностью, если использовать такую МПЛ для защиты от них.

2. МПЛ с двумя симметричными проводниками сверху, заземленными не полностью, а только на концах, характеризуется не одной, а тремя погонными задержками. Первые две из них становятся меньше прежней, а третья – больше, что соответствует модам, распространяющимся более в воздухе и диэлектрике. Однако, из-за симметрии проводников, влияния самой быстрой моды на выходной сигнал нет, и он определяется двумя оставшимися. С ростом высоты проводников и расстояния между ними разность задержек этих мод растет, а их отклонения от прежней уменьшаются, в среднем от 30% до 10%. Это может привести к аналогичным искажениям импульса, как при одном проводнике, хотя и менее выраженным. Тем не менее, разложение воздействующего импульса на два импульса оказывается возможным.

3. МПЛ с двумя симметричными проводниками на или в диэлектрике, заземленными не полностью, а только на концах, также характеризуется не одной, а тремя погонными задержками. Также, первые две из них становятся меньше прежней, а третья – больше, что соответствует модам, распространяющимся более в воздухе и диэлектрике. Также, из-за симметрии проводников, влияния самой быстрой моды на выходной сигнал нет, и он определяется двумя оставшимися. Однако с углублением проводников увеличение расстояния между ними влияет иначе: разность задержек этих двух мод уменьшается, их отклонения от прежней уменьшаются, и они довольно малы, в среднем около 10%. Это может привести к аналогичным искажениям импульса, как при одном проводнике, но ещё менее выраженным. Из-за этого, разложение на два импульса затруднено, особенно при углублении проводников.

4. Три указанные выше МПЛ обладают защитными свойствами, представляя собой модальный фильтр (МФ): на них поданы три заявки на изобретение (на одну уже получено положительное решение). Особенности новых

МФ: равные амплитуды напряжения импульсов получаются при коротком замыкании пассивного проводника на обоих концах опорного; равенство амплитуд напряжения импульсов обеспечивается при резко асимметричном расположении проводников относительно опорного; в случае одного проводника сверху, обеспечивается весьма высокая разность погонных задержек, позволяющая защиту от СКИ большой длительности или уменьшение длины МФ, но два боковых проводника на диэлектрике упрощают изготовление МФ.

5. В результате поэтапного моделирования МПЛ с заземленными проводниками создана методика оценки влияния заземления дополнительных проводников на характеристики МПЛ: ввод параметров; создание геометрической модели поперечного сечения; вычисление матрицы \mathbf{L} и \mathbf{C} ; вычисление τ и Z в предположении полного заземления дополнительных проводников; вычисление произведения матриц \mathbf{L} и \mathbf{C} и его собственных значений и векторов; построение временных откликов на воздействие СКИ в предположении заземления дополнительных проводников только на концах; вычисление отклонения задержек мод в %.

4. Оценка влияния температуры на характеристики модифицированных МПЛ

В подразделе 4.1 оценены влияния температуры на характеристики и параметры модифицированных МПЛ. В подразделе 4.2 оценены влияния температуры на собственные значения и векторы произведения матриц \mathbf{L} и \mathbf{C} и временные отклики модифицированных МПЛ.

Таким образом, впервые представлены систематизированные результаты исследования влияния температуры на параметры и значения τ и Z , на собственные значения и векторы, а также временные отклики, модифицированных МПЛ. По результатам видно, что основное влияние температура оказывает на ϵ_r . Так, при одновременном влиянии температуры на все параметры линии, показано, что поведение зависимостей τ и Z остается прежним, однако их значения могут существенно (до 3%) измениться. Касательно представленных результатов влияния температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики без учета потерь, показано, что из-за влияния температуры на ϵ_r погонные задержки с увеличением температуры могут уменьшаться, так что их разность уменьшается на 9–22%. В результате поэтапного моделирования создана методика оценки влияния температуры на характеристики МПЛ: ввод начальной и конечной температур и шага изменения температуры; ввод температурных коэффициентов параметров; задание температурной модели; оценка влияния заземления дополнительных проводников на характеристики МПЛ.

5. Подтверждение достоверности результатов

Для проверки достоверности результатов раздела 2 для экранированной МПЛ выполнены вычисления τ и Z в трех различных программах: FasterCap (основана на МоМ), а также FEMM и FEM2D (основаны на МКЭ). Для примера приведено сравнение результатов при $w=0,1$ мм (рисунок 5.1). Видно, что при $h_1=0,2$ мм отклонение значения τ для FEM2D от TALGAT наибольшее, но оно около 2%. Зависимости Z для FasterCap и FEM2D имеют более выраженные

отклонения, но они также в пределах 2%. Значения τ и Z при расчетах в программах TALGAT и FasterCap очень близки, что объяснимо тем, что обе они основаны на МоМ. Сравнены временные отклики МПЛ с проводником сверху, полученных по разным моделям. Результаты идентичны (рисунок 5.1 в).

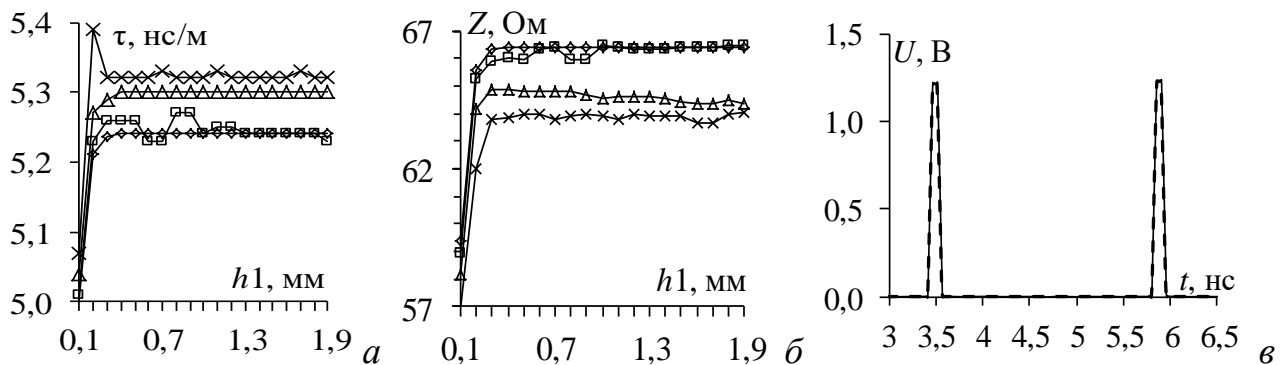


Рисунок 5.1 – Зависимости τ (а) и Z (б) от $h1$ при $w=0,1$ мм для TALGAT (\diamond), FasterCap (\square), FEMM (Δ), FEM2D (\times); формы напряжения на выходе МПЛ с проводником сверху, по алгоритмической (—) и аналитической (---) моделям (в)

Проверены результаты раздела 3 для МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками: разработаны и изготовлены макеты, измерены и вычислены их временные и частотные характеристики, а также выполнено их сравнение. Разработаны и изготовлены макеты с поперечным сечением из рисунка 5.2.

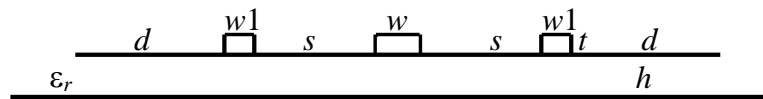


Рисунок 5.2 – Поперечное сечение МПЛ макетов

На рисунке 5.3 представлены фото макетов и воздействие. По нормативным документам на материал СТФ-2-105-0,5 взято $\epsilon_r=4,7$ и $tg\delta=0,030$. Измерены реальные геометрические параметры, средние значения которых составили: для обоих макетов $h=0,5$ мм, $t=105$ мкм, $w=0,45$ мм, $w1=0,2$ мм, $s=0,5$ мм, а также $l=61$ мм для макета 1 и $l=32,9$ см для макета 2.

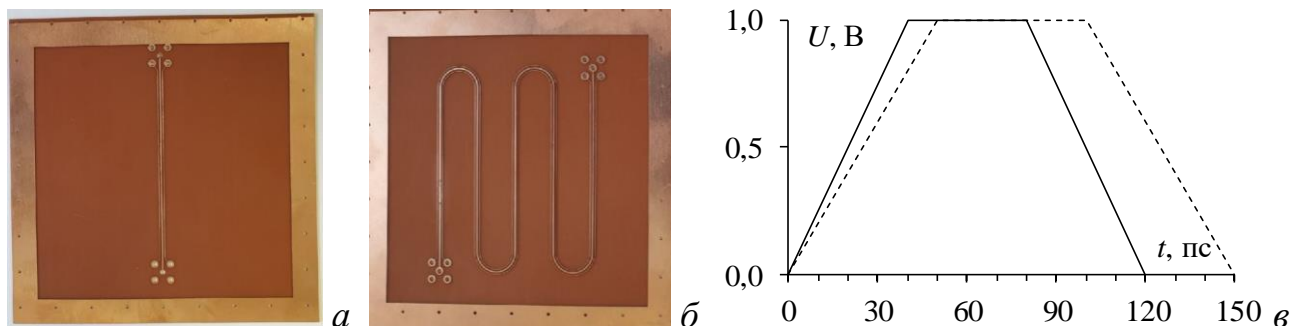


Рисунок 5.3 – Фото макетов 1 (а) и 2 (б) и ЭДС воздействия с временем нарастания, плоской вершины и спада по 40 (—) и 50 (- -) пс

Экспериментальные исследования во временной и частотной областях для двух макетов выполнены на основе измерения S -параметров с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) серии Р4М-40 «МИКРАН» (рисунок 5.4 а), подключавшегося к макетам через SMA соединители. Затем по измеренным данным S -параметров в системе ADS для получения временных откликов

подавались входные импульсы с параметрами по 40 и 50 пс (рисунок 5.3 в) с ЭДС по 1 В. Также для двух макетов во временной и частотной областях выполнено квазистатическое моделирование в системе TALGAT.

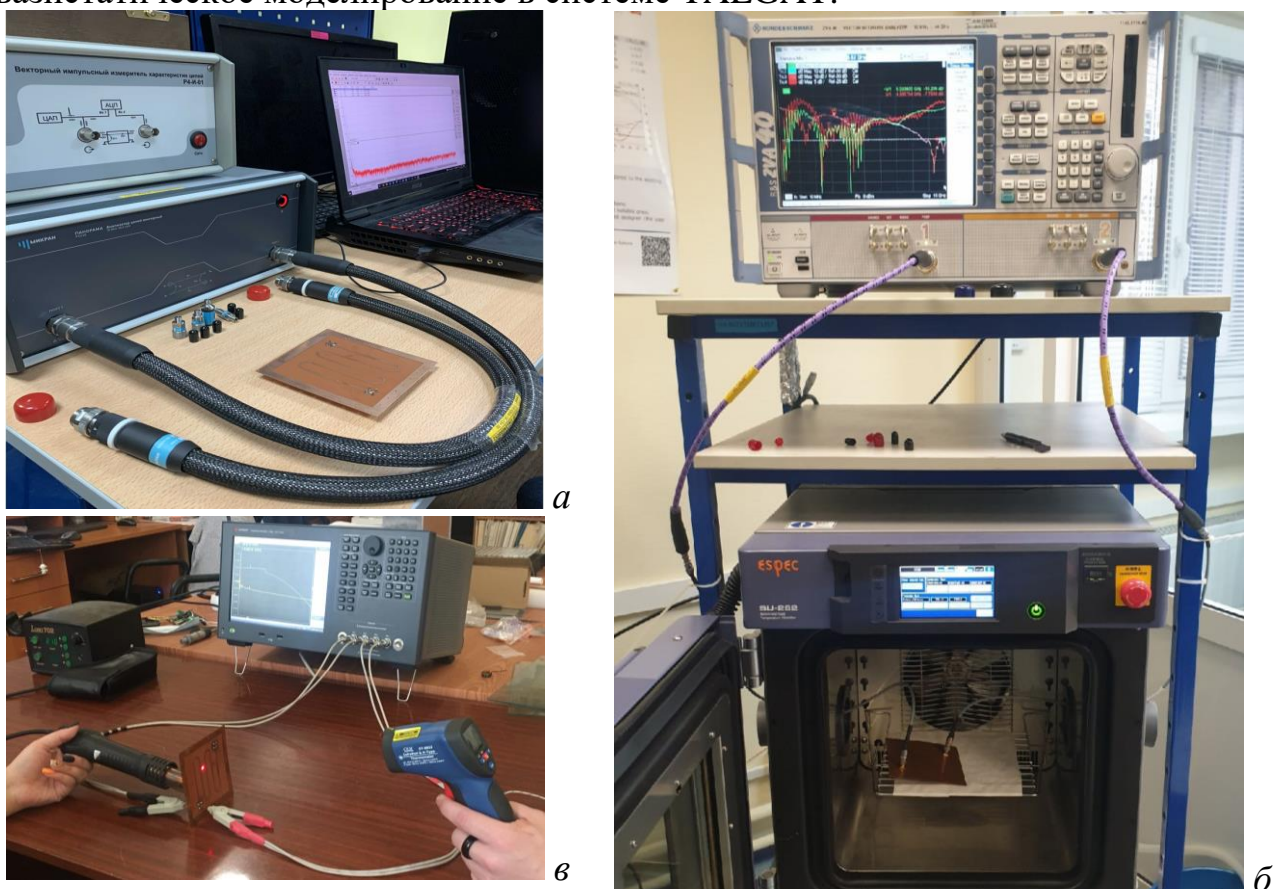


Рисунок 5.4 – Фото векторного анализатора цепей P4M-40 (а); общий вид установки для измерения S -параметров макета 2 в диапазоне температур от -50 до 150 °C (б); измерение емкости при $T=30, 70, 150$ °C (в)

На рисунке 5.5 показаны результаты эксперимента и моделирования во временной области. В макете 1 СКИ не разложился на импульсы при данных геометрических параметрах и поданных входных импульсах, однако, в отличие от результатов для импульса с параметрами по 50 пс (рисунок 5.5 а), амплитуды для импульса 40 пс хорошо согласуются и равны 0,4 В. Для 40 пс чётче видно начало разложения и вызванная им меньшая амплитуда. Задержки импульсов при моделировании и эксперименте отличаются примерно на 0,05 нс, что составляет $\pm 0,025/0,3 = \pm 8\%$. Это отклонение может быть вызвано нестрогим учётом задержек в ответвлениях, соединителях и переходах. Кроме того, значение ϵ_r при моделировании могло оказаться больше реального. Наконец, измерения имеют свою погрешность. В макете 2 СКИ разложился на два импульса, как и предполагалось при предварительном моделировании. При этом, амплитуда второго импульса несколько выше, чем первого, что может быть вызвано наложением фронта второго импульса на спад первого, из-за неполного разложения. Это менее выражено для 40 пс, где амплитуды почти равны, особенно при эксперименте (0,15 В). Как и в макете 1, задержки импульсов при моделировании и эксперименте отличаются примерно на 0,05 нс, что составляет

$\pm 0,025/1,7 = \pm 1,5\%$. Кроме того, при моделировании разность задержек импульсов больше, чем при эксперименте (хотя её и трудно оценить точно из-за неполного разложения), что подтверждает предположение о том, что значение ε_r при моделировании больше реального.

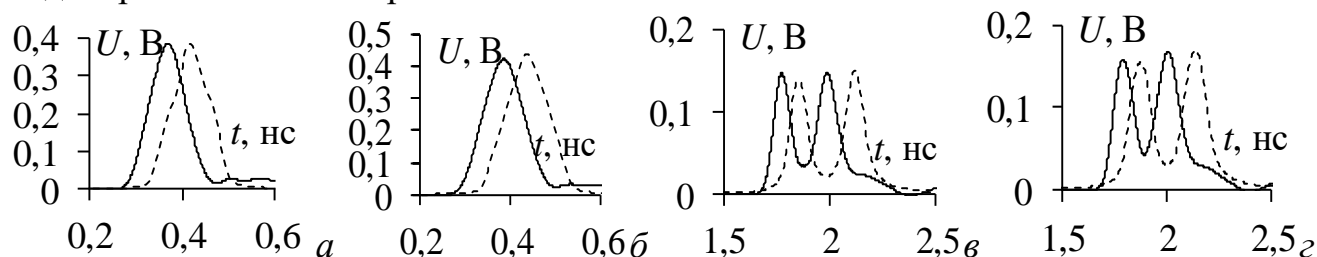


Рисунок 5.5 – Формы напряжения на выходе макета 1, полученные при моделировании (- -) и эксперименте (—) при входных импульсах с параметрами по 40 (а) и 50 (б) пс; аналогичные формы (в, з) для макета 2

Таким образом, представлены результаты моделирования и эксперимента во временной области для двух макетов с различием задержек $\pm 8\%$ и $\pm 1,5\%$. Для макета 1 СКИ не разложился на импульсы, так как длина линии 61 мм мала, а в макете 2 с длиной 329 мм СКИ разложился на два импульса. При этом для входного импульса с параметрами по 40 пс при эксперименте выравнены амплитуды импульсов. Тем самым, экспериментально подтверждено, что такую линию при данных параметрах можно использовать как МФ.

Далее представлено подтверждение достоверности результатов раздела 4 на основе сравнения результатов измерения и моделирования для макета МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками при изменении температуры.

Экспериментальные исследования во временной и частотной областях выполнены при изменении температуры от -50 до $+150$ °С, на основе измерения S -параметров с помощью ВАЦ R&S ZVA 40, при размещении макета 2 в климатической (испытательной) камере тепла-холода ESPEC SU-262 (рисунок 5.4 б). ВАЦ соединялся с SMA соединителями измерительными кабелями Rohde Schwarz ZV-Z195 и Semflex 60637. Преобразование измеренных S -параметров во временную область выполнено в системе ADS. В качестве воздействия подан входной импульс с параметрами по 40 пс. Также выполнено квазистатическое моделирование во временной и частотной областях в системе TALGAT с учетом температурной модели. При моделировании значения α для меди приняты такими же, как в разделе 4. Для материала СТФ-2-105-0,5 с $\varepsilon_r = 4,7$ принято $\alpha = 8,33 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Это значение получено с помощью дополнительного измерения c_{11} (первого элемента матрицы C) анализатором импеданса KEYSIGHT E49990A, подключенным к макету с помощью кабелей, нагрева феном фольгированной стороны макета и измерения температуры с помощью пирометра InfraRed& K-Type Thermometer DT-8833 (рисунок 5.4 в).

На рисунке 5.6 представлены полученные результаты для моделирования и эксперимента при $T = -50, 25$ и 150 °С. Видно, что СКИ раскладывается на два импульса. С увеличением T задержки импульсов увеличиваются как при моделировании, так и при эксперименте, а амплитуды импульсов уменьшаются. Из результатов моделирования без учета изменения потерь при изменении $T = -50$,

25 и 150 °С (рисунок 5.6 а) видно, что амплитуды импульсов значительно отличаются от результатов эксперимента. Поэтому проведено тестовое моделирование с учетом изменения потерь в диэлектрике в 2 раза при $T = -50$ и 150 °С (рисунок 5.6 б). Видно, что амплитуды импульсов уменьшились, как и в эксперименте, поскольку потери влияют на дисперсию.

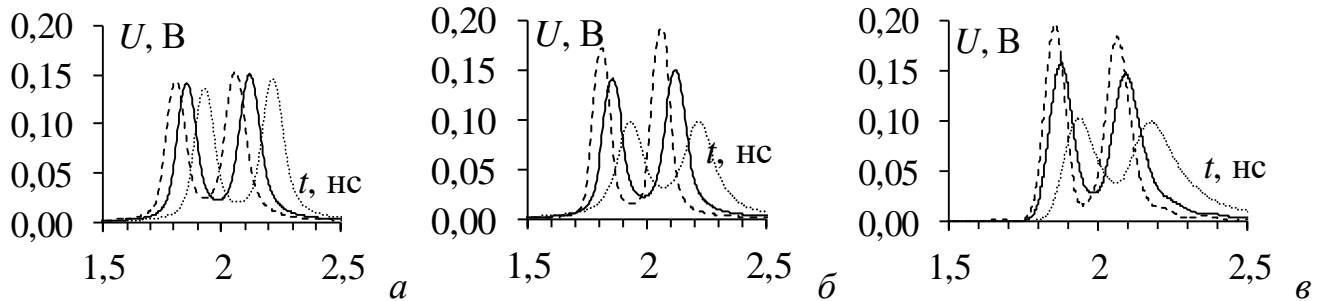


Рисунок 5.6 – Формы напряжения на выходе макета 2, полученные при моделировании без учета (а) и с учетом (б) изменения потерь в диэлектрике и эксперименте (в) для $T = -50$ (---), 25 (—), 150 (· · ·) °С

Количественная оценка отклонений задержки и амплитуды напряжения импульса 1 показала согласованность результатов моделирования и эксперимента, изменение задержки около 1%, а амплитуды в диапазоне 21–36% (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Отклонения задержки и амплитуды импульса 1

Результат	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, \%$	$\Delta U, \%$
Моделирование с учетом изменения потерь	-50	-0,57	21,42
	150	1,15	-35,71
Эксперимент	-50	-1,12	26,67
	150	1,12	-33,33

Наконец, оценим различие измерений разными приборами. На рисунке 5.7 дополнительно приведено сравнение результатов экспериментов и моделирования для макета 2 во временной области и сравнение результатов экспериментов в частотной области при $T = 25^\circ\text{C}$. Видно, что импульсы, измеренные с помощью R&S ZVA 40, приходят позже на 0,1 нс, чем P4M-40, тогда как при моделировании они приходят позже на 0,05 нс, так что результаты моделирования близки к результатам обоих измерений. Амплитуда импульса 1 оказалась между измеренными, а амплитуды импульса 2 совпали. Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ незначительно отличаются, а $|S_{21}|$ совпали.

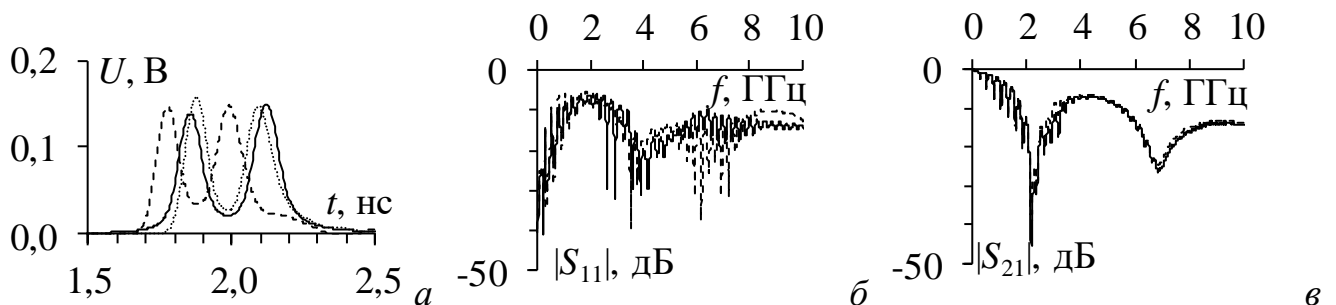


Рисунок 5.7 – Формы напряжения на выходе макета 2, полученные при моделировании (—) и на P4M-40 (---) и R&S ZVA 40 (· · ·) (а); частотные зависимости $|S_{11}|$ (б) и $|S_{21}|$ макета 2 (в) на P4M-40 (—) и R&S ZVA 40 (---)

Таким образом, возможность корректных оценок влияния температуры на разложение импульсов в МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками подтверждена экспериментально.

Основные результаты раздела и выводы

1. Представлены результаты вычислительных экспериментов по оценке чувствительности характеристик (τ и Z) экранированной МПЛ в 3 различных программах (FasterCap, FEMM, FEM2D), основанных на двух методах (MoM и МКЭ). Выполнено сравнение результатов, полученных в разделе 2 (TALGAT, MoM), с результатами этих программ. Оно показало отклонение менее 2%. Таким образом, подтверждена достоверность ряда результатов раздела 2.

2. Сравнены временные отклики, полученные по алгоритмической (в TALGAT) и аналитической моделям (в Mathcad), для МФ на основе МПЛ с одним заземленным проводником сверху. Результаты оказались идентичными. Таким образом, подтверждена достоверность результатов для МФ из раздела 3.

3. Впервые выполнены экспериментальные исследования макетов МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками. Сравнены результаты моделирования и эксперимента во временной и частотной областях для двух макетов МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками, отличающимися длиной. В макете 2 с увеличенной длиной СКИ с параметрами по 40 пс разложился на 2 импульса с равными амплитудами, что дает возможность использовать линию как МФ. Таким образом, экспериментально подтверждены результаты раздела 3. Проведено измерение и моделирование в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц. Получена хорошая согласованность для полосы пропускания и приемлемая для частоты первого резонанса. Различия вызваны неточным учетом частотной зависимости ϵ_r при моделировании с учетом потерь в диэлектрике, а также неучетом влияния SMA соединителей.

4. Впервые выполнены экспериментальные исследования по разложению СКИ в макете МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками при изменении температуры. Сравнены результаты моделирования и эксперимента во временной и частотной областях (до 15 ГГц) для макета с увеличенной длиной и параметрами входного импульса по 40 пс при изменении температуры от -50°C до $+150^\circ\text{C}$. Сравнение результатов во временной области показало согласованность результатов моделирования и эксперимента, изменение задержки около 1%, а амплитуды в диапазоне 21–36%. Результаты моделирования и эксперимента при изменении температуры отличаются, что связано с неучтенными факторами при моделировании (значения потерь при охлаждении и нагревании), а также принятых при моделировании и реальных значений ϵ_r . Между тем результаты моделирования временного отклика оказались близки к результатам измерений разными приборами. Таким образом, подтверждена возможность получения корректных оценок с помощью моделирования, как это сделано в разделе 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования

В ходе исследований выполнены: обзор модификаций полосковых линий и подходов к их моделированию, анализ чувствительности характеристик

модифицированных МПЛ, анализ собственных значений и векторов произведения матриц \mathbf{L} и \mathbf{C} и временного отклика МПЛ с заземленными проводниками, оценка влияния температуры на характеристики модифицированных МПЛ, подтверждение достоверности результатов. Основные результаты работы:

1. Многовариантный квазистатический анализ τ и Z модифицированных МПЛ позволил минимизировать, вплоть до нулевой, их чувствительность к изменению отдельных параметров.

2. Показано, что при определённых параметрах МПЛ с одним или двумя заземленными на концах проводниками воздействующий СКИ разлагается на два импульса, и поэтому линию можно использовать как МФ. На этой основе предложены три новых МФ, позволяющих защиту от СКИ. Поданы три заявки на изобретения, на одну из которых получено положительное решение.

3. На основе оценки влияния температуры на параметры и характеристики (τ , Z , собственные значения и векторы, временная и частотная характеристики) модифицированных МПЛ выявлено, что основное влияние температура оказывает на ϵ_r . При одновременном влиянии температуры на все параметры линии поведение зависимостей погонной задержки и волнового сопротивления остается прежним, однако их значения могут существенно (до 3%) измениться. По результатам влияния температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики без учета потерь, показано, что погонные задержки с увеличением температуры могут уменьшаться, так что их разность уменьшается на 9–22%.

4. Сформулированы методики по оценке влияния заземления дополнительных проводников и температуры на характеристики МПЛ.

5. Выполнено подтверждение достоверности результатов исследований разделов 2–4, с хорошей согласованностью, при сравнении: τ и Z экранированной МПЛ, вычисленных 4 программами на основе двух методов; временных откликов МФ, вычисленных по алгоритмической и аналитической моделям; временных и частотных характеристик, полученных моделированием и экспериментом, в т.ч. при влиянии температуры.

Рекомендации

Результаты работы могут быть использованы для проектирования линий передачи со стабильными характеристиками. При этом целесообразен точный учёт зависимости ϵ_r от температуры. Предложенные МФ могут использоваться для защиты от СКИ. Подходы к моделированию могут быть применены в образовательном процессе.

Перспективы дальнейших исследований

Аналогичные исследования могут быть выполнены и для других наборов параметров, а также типов линий. Для неэкранированных линий полезно исследование на излучаемые эмиссии. Новые МФ перспективно исследовать более детально.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Сагиева И. Исследование характеристик экранированной микрополосковой линии / И. Сагиева // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12/2. – С. 103–107.
2. Sagiyeva I.Ye. Side grounded conductors dipped in a substrate of a microstrip line, as a tool of line characteristics control / I.Ye. Sagiyeva, T.R. Gazizov // Siberian journal of science and technology. – 2018. – Vol. 19. No. 2. – P. 303–307.

Статья в журнале, входящем в Q1 WoS и Scopus

3. Gazizov T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, and S.P. Kuksenko // Complexity.–2019. – Vol. 2019. – P. 11. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>.

Статьи в изданиях, индексируемых WoS и Scopus

4. Sagiyeva I.Ye. Modeling of microstrip line characteristics with side grounded conductors near air–substrate boundary / I.Ye. Sagiyeva, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series [Electronic resources]. –2018. – Vol. 1118, no. 2. – P. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/1118/1/012032.
5. Malygin K.P. Multicriteria optimization of a meander line with broad-side coupling by genetic algorithms / K.P. Malygin, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.T. Gazizov, I.Y. Sagiyeva // Journal of Physics: Conference Series [URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/2/022058>]. – 2020. – Vol. 1679. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022058.

Публикации в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus

6. Sagiyeva I.Y. The influence of temperature on microstrip transmission line characteristics / I.Y. Sagiyeva, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // 21st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020. – P. 191–194.
7. Sagiyeva I.Y. Modal analysis of a microstrip line with polygons in the air / I.Y. Sagiyeva, T.R. Gazizov // 21st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020. – P. 183–186.
8. Sagiyeva I.Y. Modal filters based on a microstrip line with overhead conductors grounded at both ends / I.Y. Sagiyeva, T.R. Gazizov, Z.M. Kenzhegulova, R.S. Surovtsev // 22st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – Altai, June 30 – July 4, 2021. – P. 176–179.

Публикации в трудах других конференций

9. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии, покрытой заземленным проводником / И.Е. Сагиева // Научная сессия ТУСУР – 2017: Материалы Международной научно–технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа. – Томск, Россия, 10–12 мая, 2017. – Ч. 3. – С. 77–79.
10. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку /

- И.Е. Сагиева // Сборник тезисов научно–технической конференции молодых специалистов АО «ИСС». – Железногорск, Россия, 23–25 августа, 2017. – С. 89–91.
11. Сагиева И.Е. Экранирование микрополосковой линии как ресурс для уменьшения чувствительности ее характеристик / И.Е. Сагиева // 23-я Международная научно–практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-23-2017)». – Томск, Россия, 24 ноября, 2017. – С. 145–149.
 12. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками сверху / И.Е. Сагиева // Материалы XIII международной научно–практической конференции «Электронные средства и системы управления», посвященная 55-летию ТУСУРа. – Томск, Россия, 29 ноября – 1 декабря, 2017. – Ч. 2. – С. 19–20.
 13. Sagiyeva I.Ye. Decrease of microstrip line characteristics sensitivity at the expense of a shielding / I.Ye. Sagiyeva, T.R. Gazizov // Actual problems of radiophysics. Proceedings of the VII International Conference «APR–2017». – Tomsk, Russia, September 18–22, 2018. – P. 67–70.
 14. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками у границы воздух–подложка // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам международной научно–технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018». – Томск, Россия, 16–18 мая, 2018. – Ч. 2. – С. 278–280.
 15. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками у границы воздух–подложка при изменении толщин проводников // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сборник материалов XIV международной научно–практической конференции, посвященной Дню космонавтики. – Красноярск, Россия, 09–13 апреля, 2018. [Электронное издание] –Т. 1. – С. 386–388.
 16. Сагиева И.Е. Результаты научных исследований как ресурс для совершенствования обучения по магистерской программе // 24-я Межд. науч.–практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-24-2018)». – Томск, Россия, 28 ноября, 2018. – С. 162–166.
 17. Куксенко С.П. Переформирование предобусловливателя при решении последовательности систем линейных алгебраических уравнений / С.П. Куксенко, А.А. Квасников, И.Е. Сагиева // Тезисы докладов международной научной конференции «Методы вычислений и математическая физика». – Сочи, Россия, 10–15 августа, 2020. – С. 93–96.
 18. Сагиева И.Е. Микрополосковая линия с заземленным проводником сверху, защищающая от сверхкоротких импульсов / И.Е. Сагиева // 26-я международная научно–практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-26-2020)». –Томск, Россия, 24 ноября, 2020. – С. 123–126.
 19. Нурхан Б.Е. Влияние температуры на характеристики микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками сверху / Б.Е. Нурхан, И.Е. Сагиев //

Материалы XV международной научно–практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 18–20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 310–312.

20. Сагиева И.Е. Микрополосковая линия с двумя симметричными проводниками сверху, защищающая от сверхкоротких импульсов / И.Е. Сагиева // Материалы XV международной научно–практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 18–20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 316–317.
21. Сагиева И.Е. Многовариантный анализ экранированной микрополосковой линии методами моментов и конечных элементов / И.Е. Сагиева, Д.В. Клюкин // Материалы XV международной научно–практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 18–20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 318–320.
22. Сагиева И.Е. Влияние температуры на характеристики микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками / И.Е. Сагиева, Б.Е. Нурхан // Материалы научно–технической конференции «Научная сессия ТУСУР–2021» – Томск, Россия, 19–21 мая, 2021. – Ч. 1. – С. 226–229.
23. Сагиева И.Е. Влияние температуры на характеристики микрополосковой линии передачи / И.Е. Сагиева, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Материалы конференции «XXI международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM-2020)». – Новосибирск, Россия, 29 июня – 04 июля, 2020. – С. 40.
24. Сагиева И.Е. Модальный анализ микрополосковой линии с полигонами в воздухе / И.Е. Сагиева, Т.Р. Газизов // Материалы конференции «XXI международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM-2020)». – Новосибирск, Россия, 29 июня – 04 июля, 2020. – С. 39.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

25. 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., Газизов Русл.Р., Бусыгина А.В., Лежнин Е.В., Орлов П.Е., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Ахунов Р.Р., Газизов Руст.Р., Газизов А.Т., Хажобеков Р.Р., Квасников А.А., Носов А.В., Белоусов А.О., Тернов С.А., Сагиева И.Е., Демаков А.В., Осинцев А.В., Собко А.А. Заявка №2017663209. Дата поступления 13 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.
26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661873. Вычисление характеристик экранированной микрополосковой линии. Авторы: Сагиева И.Е., Газизов Т.Р. Заявка №2018616265. Дата поступления 18 июня 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.09.2018 г.