

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Сагиева Индира Ериковна

Стабильность характеристик  
модифицированных микрополосковых линий

Специальность 2.2.14  
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р. техн. наук, доцент  
Газизов Тальгат Рашитович

Томск 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР МОДИФИКАЦИЙ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ И ПОДХОДОВ К ИХ МОДЕЛИРОВАНИЮ .....	12
1.1 Модифицированные полосковые линии.....	12
1.2 Подходы к моделированию характеристик полосковых линий.....	20
1.2.1 Многовариантный квазистатический анализ.....	20
1.2.2 Метод моментов.....	21
1.2.3 Модальный анализ.....	23
1.2.4 Вычисление временного отклика полосковой линии .....	24
1.2.5 Температурная модель .....	25
1.3 Цель и задачи работы.....	26
2. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ.....	27
2.1 Исследуемые модифицированные микрополосковые линии .....	27
2.2 Анализ чувствительности характеристик покрытой заземленным проводником и экранированной микрополосковых линий.....	28
2.3 Анализ чувствительности характеристик микрополосковых линий с двумя боковыми заземленными проводниками .....	31
2.4 Основные результаты раздела и выводы .....	37
3. АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И ВЕКТОРОВ ПРОИЗВЕДЕНИЯ МАТРИЦ $L$ И $C$ И ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ С ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ.....	38
3.1 Моделируемые схемы.....	38
3.2 Микрополосковая линия, покрытая заземленным проводником.....	39
3.3 Микрополосковая линия с двумя боковыми заземленными проводниками .....	50
3.4 Микрополосковые линии со свойствами защиты от сверхкоротких импульсов.....	119
3.5 Основные результаты раздела и выводы .....	124

4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ.....	127
4.1 Оценка влияния температуры на характеристики и параметры модифицированных микрополосковых линий.....	127
4.1.1 Микрополосковая линия .....	127
4.1.2 Микрополосковая линия, покрытая заземленным проводником .....	131
4.1.3 Микрополосковая линия с двумя боковыми заземленными проводниками .....	134
4.2 Оценка влияния температуры на собственные значения и векторы произведения матриц $L$ и $C$ и временные отклики модифицированных микрополосковых линий.....	147
4.2.1 Микрополосковая линия, покрытая заземленным проводником .....	147
4.2.2 Микрополосковая линия с двумя боковыми заземленными проводниками .....	150
4.3 Основные результаты раздела и выводы .....	159
5. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	161
5.1 Сравнение характеристик экранированной микрополосковой линии, полученных разными методами и программами.....	161
5.2 Сравнение временных откликов микрополосковой линии, покрытой заземленным проводником, полученных алгоритмической и аналитической моделями.....	164
5.3 Экспериментальные исследования микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками.....	167
5.3.1 Разработка макетов .....	167
5.3.2 Экспериментальные исследования во временной области .....	173
5.3.3 Экспериментальные исследования в частотной области .....	175

5.4 Экспериментальные исследования микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками при изменении температуры.....	179
5.4.1 Экспериментальные исследования во временной области при изменении температуры.....	183
5.4.2 Экспериментальные исследования в частотной области при изменении температуры.....	186
5.5 Основные результаты раздела и выводы.....	194
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	197
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	205

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 и волнового сопротивления, и в целом актуально уменьшение чувствительности электрических характеристик линий к изменению их физических параметров (т.е. геометрических параметров, а также параметров диэлектрических материалов). При этом важен учет влияний температуры, поскольку она является важным внешним эксплуатационным фактором, меняющим одновременно все физические параметры линий.

### **Степень разработанности темы**

Различные аспекты, связанные со стабильностью характеристик полосковых линий исследовали P. Bhartia, E. Bogatin, D.C. Dhubkarya, S.K. Devendra, H.-M. Li, L.G. Maloratsky, C.-H. Ra, M. Riazat, 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 в работе далее, 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 микрополосковых линий.
3. Анализ собственных значений и векторов произведения матриц погонных коэффициентов электромагнитной и электростатической индукции и временного отклика микрополосковых линий с заземленными проводниками.
4. Оценка влияния температуры на характеристики модифицированных микрополосковых линий.
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 разнеса проводников, показывающие возможности уменьшения чувствительности, вплоть до нулевой.
2. Теоретически и экспериментально исследовано распространение импульсного сигнала в микрополосковых линиях с дополнительно введёнными 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.

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 сверхкоротких импульсов (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.

6. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РФФ 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», проект FEWM-2020-0039, 2020–2022 г.

9. Учебный процесс студентов и магистрантов радиотехнического факультета ТУСУРа 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.** Во введении представлена краткая характеристика 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.

# 1. ОБЗОР МОДИФИКАЦИЙ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ И ПОДХОДОВ К ИХ МОДЕЛИРОВАНИЮ

## 1.1 Модифицированные полосковые линии

Исторической основой МПЛ была коаксиальная линия, которая обеспечивает доминирующую моду с нулевой частотой отсечки, низкими потерями и очень широкой полосой пропускания. Однако изготовить эту линию трудно, и дорого создавать пассивные и активные компоненты и устройства на основе такой ЛП. Первой попыткой преодоления этого недостатка была прямоугольная коаксиальная линия с полоской центрального проводника. Следующим шагом было удаление боковых стенок и расширение верхней и нижней плоскостей земли, в результате получилась полосковая линия (ПЛ). Развитие планарных ПЛ началось с 1950-х годов, когда Баррет и Барнес изобрели симметричную ПЛ [1]. Для поддержки центрального проводника она была заполнена диэлектрическим материалом.

Следующая модификация ЛП включала удаление верхней плоскости земли и верхней диэлектрической подложки. Эта модификация была названа МПЛ (рисунок 1.1) и представляется проводящей дорожкой на одной стороне подложки и одной плоскостью земли – на другой.

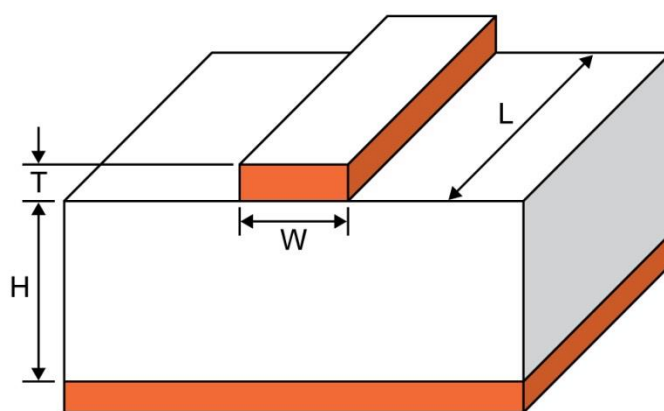


Рисунок 1.1 – Поперечное сечение МПЛ [1]

В качестве подложки служит диэлектрический материал, на который наносятся тонкопленочные металлические проводники. В течение последних 40 лет МПЛ играла ключевую роль в росте новых приложений для радиочастот и микроволн. Для радиочастотных и микроволновых устройств обычная МПЛ предлагает наименьшие размеры и самую легкую сборку. Однако ей присущи недостатки и ограничения: низкая добротность, излучение, электромагнитные помехи, дисперсия и влияние окружающей среды. Поэтому созданы многочисленные модификации обычной МПЛ, которые могут использоваться в качестве альтернативных структур для высокочастотных и сверхвысокочастотных интегральных схем. Реализацию модифицированных МПЛ можно разделить на 4 категории: вариации физических размеров, вариации структуры, различные материалы подложки, модификации плоскости земли и различные формы проводников.

Важной задачей является получение стабильных характеристик линий. Поэтому актуальна минимизация чувствительности характеристик линий к изменениям их параметров. В этой связи предметом повышенного интереса становятся различные модификации МПЛ для получения характеристик, которые невозможно получить с использованием обычных МПЛ.

Так, рассмотрены подвешенная (ППЛ) и обращенная (ОПЛ) полосковые линии, позволяющие получить нулевую чувствительность к изменению толщины диэлектрических слоев [2, 3]. В данных работах для широкого диапазона параметров одиночной ППЛ и одиночной ОПЛ (рисунок 1.2) проведены вычисления волнового сопротивления ( $Z$ ) и эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r$ ). Здесь представлены лишь некоторые зависимости, интересные своими особенностями, которых нет в обычных МПЛ.

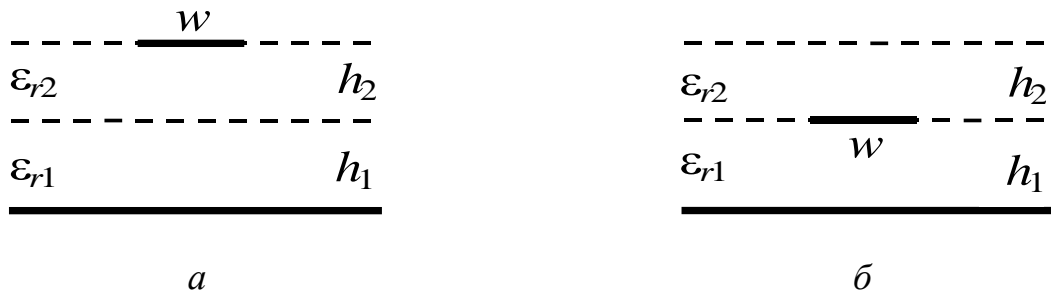
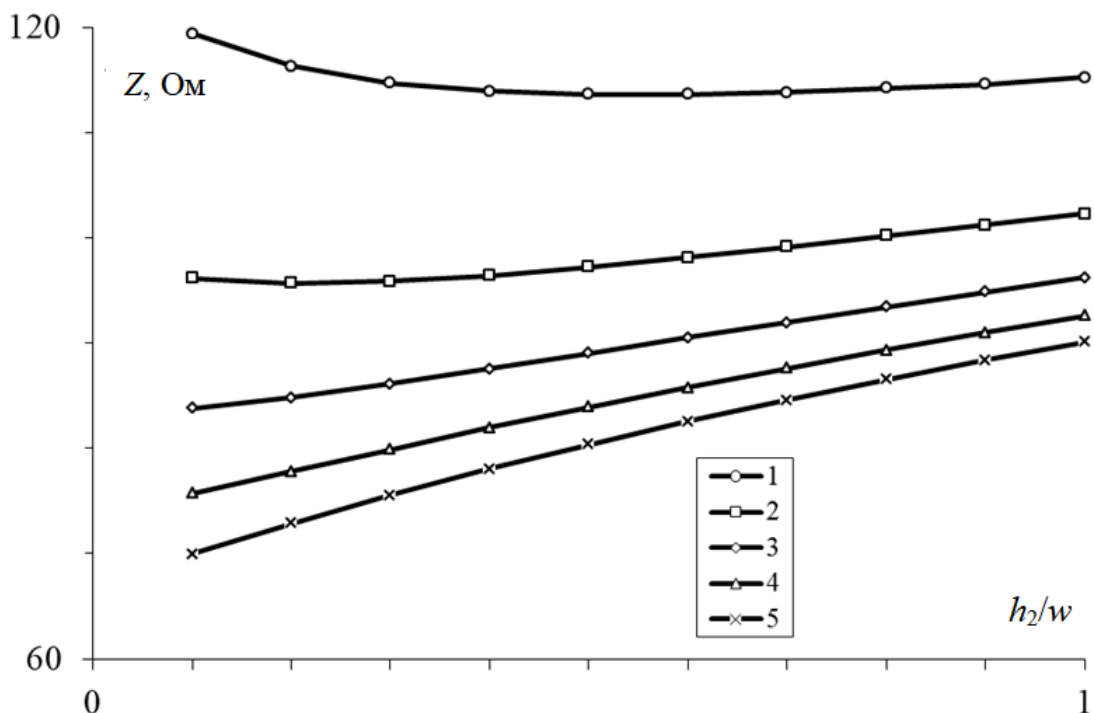


Рисунок 1.2 – Одиночная ППЛ (а) и одиночная ОПЛ (б)

Все вычисления проведены при  $\varepsilon_{r2}=5$  для разных значений  $\varepsilon_{r1}$ . На рисунке 1.3 для ППЛ показаны зависимости  $Z$  от относительной толщины подложки  $h_2/w$  при относительной толщине изолирующего слоя  $h_1/w=1$ . Характерной особенностью зависимостей является возможность получения точки минимума, а значит, нулевой чувствительности значения  $Z$  к изменению  $h_2$ . Это позволяет достичь стабильного значения  $Z$  ППЛ, особенно при тонких подложках, для которых трудно обеспечить малый относительный разброс по толщине.

Рисунок 1.3 – Зависимости  $Z$  ППЛ от относительной толщины подложки для  $\varepsilon_{r1}=1, 2, 3, 4, 5$ 

На рисунке 1.4 показаны зависимости  $\varepsilon_{re}$  ППЛ от  $h_2/w$  при  $h_1/w=1$ , а на рисунке 1.5 –  $\varepsilon_{re}$  проницаемости ОПЛ от  $h_1/w$  при  $h_2/w=1$ .

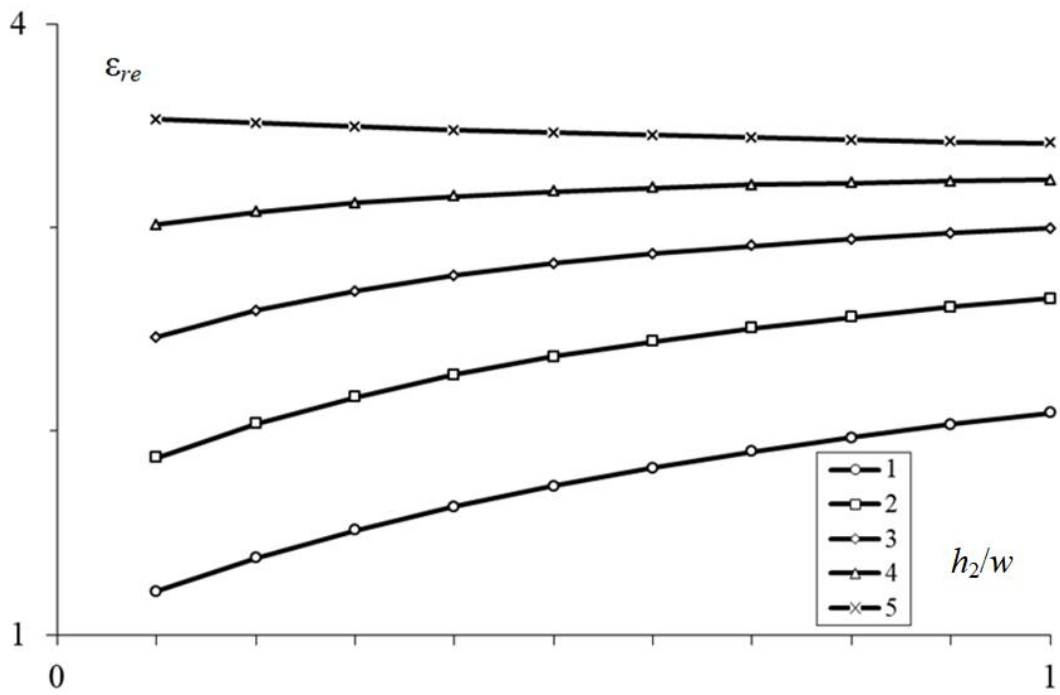


Рисунок 1.4 – Зависимости  $\epsilon_{re}$  ППЛ от относительной толщины подложки для  $\epsilon_{r1} = 1, 2, 3, 4, 5$

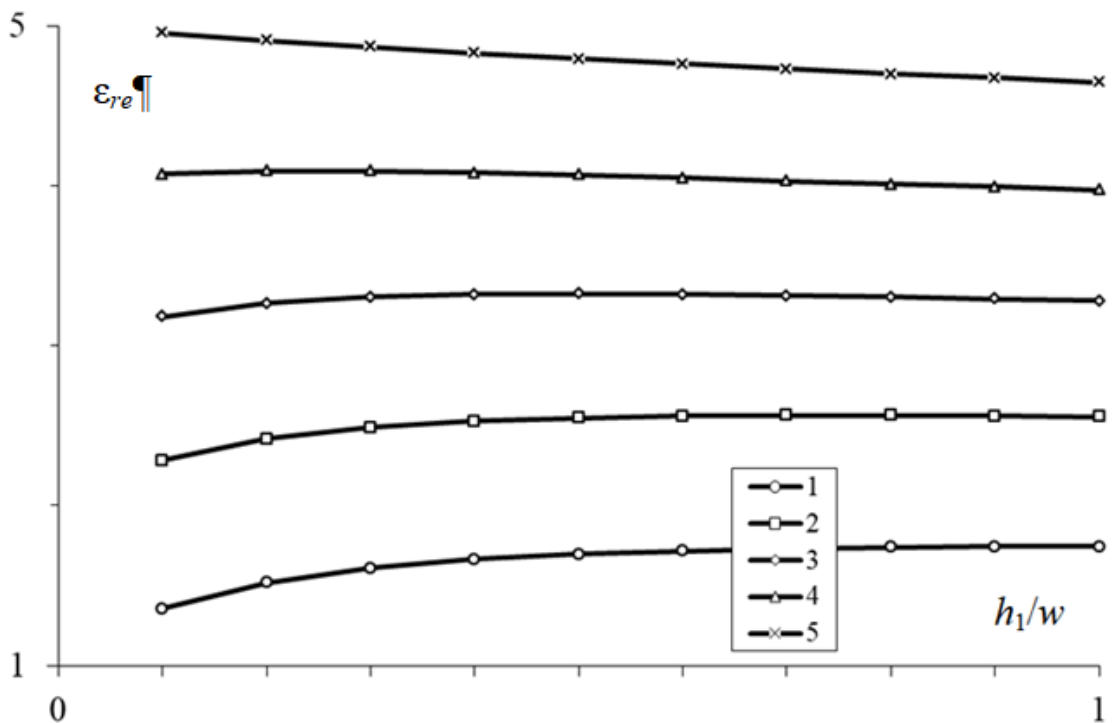


Рисунок 1.5 – Зависимости  $\epsilon_{re}$  ОПЛ от относительной толщины изолирующего слоя для  $\epsilon_{r1} = 1, 2, 3, 4, 5$

Из графиков обоих рисунков сделаны следующие выводы. Существует такое соотношение параметров ППЛ и ОПЛ, при котором  $\epsilon_{re}$  изменяется

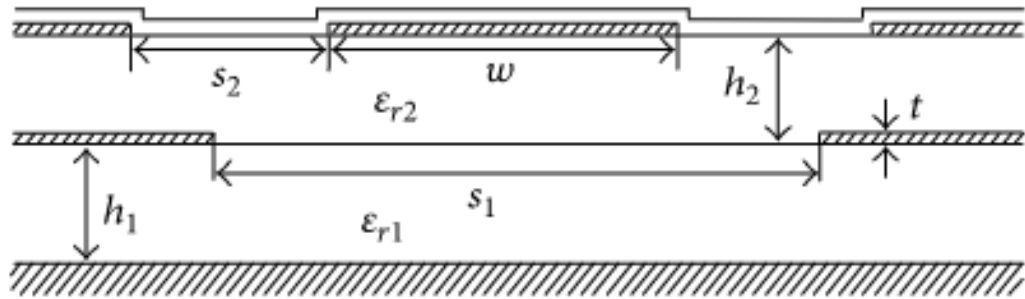
незначительно в широком диапазоне значений толщин. Эта особенность линий может быть полезна для случаев, требующих особой стабильности задержки в линиях. В отличие от случая, когда  $\epsilon_r$  обоих диэлектрических слоёв равны ( $\epsilon_{r1}=5$  и  $\epsilon_{r2}=5$  для верхних графиков обоих рисунков), при условии  $\epsilon_{r1}<\epsilon_{r2}$  (нижние графики), можно уменьшить  $\epsilon_{re}$  за счёт уменьшения толщины слоя. Это позволяет уменьшить отражения сигналов в одиночных линиях и перекрёстные помехи в связанных.

Известны исследования, в которых представлено влияние толщины линии на значения  $Z$  МПЛ [4] и выполнен детальный анализ мод и дисперсии в МПЛ с полигонами [5].

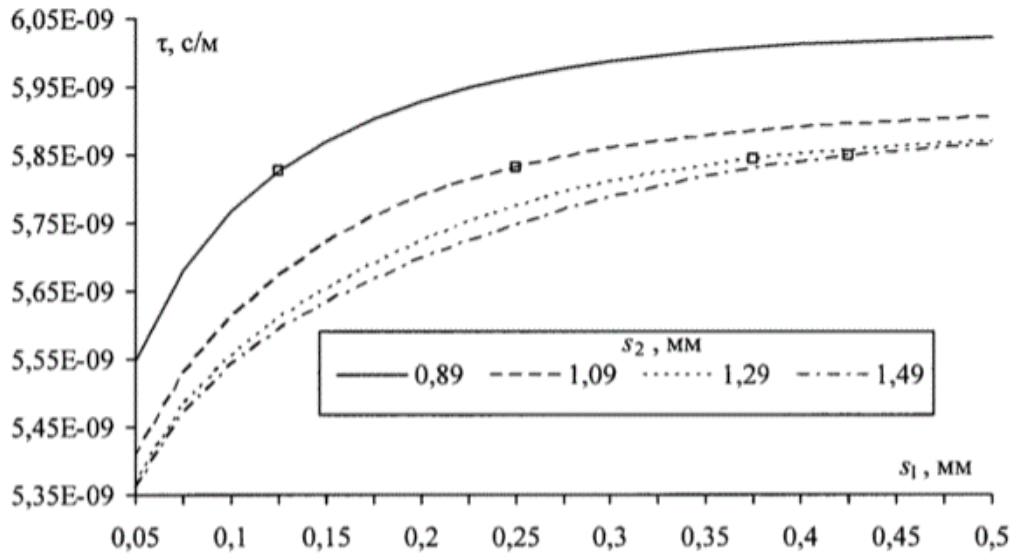
В многослойных печатных платах используются разновидности МПЛ (рисунок 1.6), например, МПЛ с полигонами на различных слоях, позволяющая получить стабильное значение  $\tau$  [6]. В данной статье вычислены  $\tau$  и  $Z$  МПЛ с полигонами на разных слоях. Выявлено, что наличие полигона на верхнем слое уменьшает задержку, а на среднем и нижнем – увеличивает. На эту линию получен патент [7]. В нём описывается МПЛ, которая обеспечивает требуемое значение  $Z$  при стабильном значении  $\tau$  за счет изменения зазоров ( $s$ ) при неизменных значениях ширины ( $w$ ) и толщины сигнального проводника ( $t$ ) и относительных диэлектрических проницаемостей диэлектриков.

Линия содержит сигнальный и опорный проводники и диэлектрическую подложку, отличаясь от обычной МПЛ линии наличием сплошных проводящих областей, находящихся на одном уровне с сигнальным проводником и ниже его. Неизменность  $\tau$  обеспечивается тем, что её значение уменьшается с уменьшением значения  $s$  на одном уровне с сигнальным проводником и увеличивается с уменьшением значений  $s$  на уровне ниже сигнального проводника.

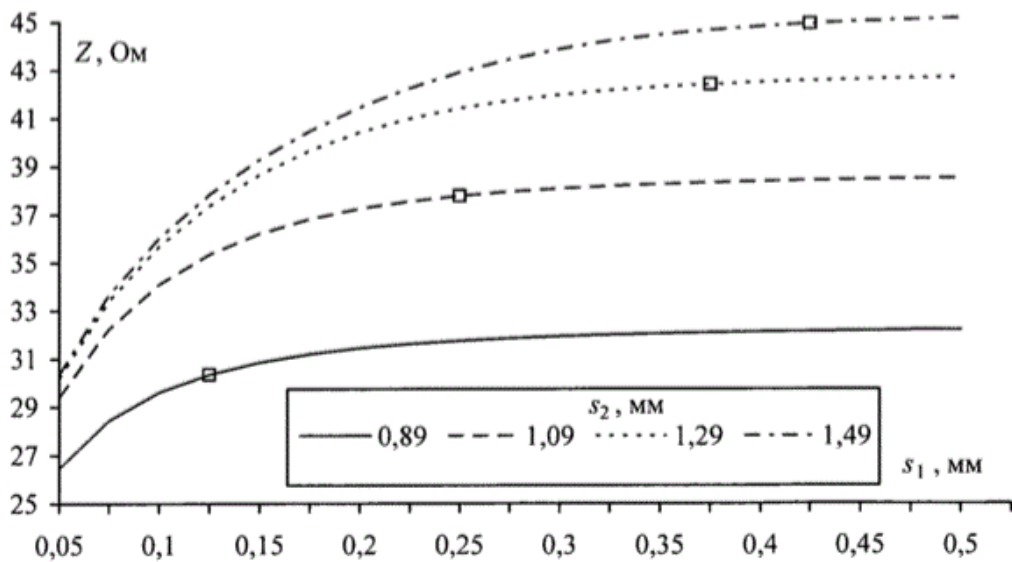




а



б



в

Рисунок 1.6 – Поперечное сечение микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками (а),  $\tau$  (б) и  $Z$  (в) [6]

С повышением плотности монтажа электронных схем возрастают электромагнитные взаимодействия между их межсоединениями, и их

рассматривают как связанные линии передачи с распределенными параметрами или, в общем случае, как многопроводные линии передачи (МПЛП) [8]. Импульсные сигналы, которые передаются по таким межсоединениям, подвергаются дополнительным амплитудным и фазовым искажениям (перекрестным помехам), вызванным электромагнитными наводками от соседних межсоединений, а также различием скоростей распространения многочисленных мод, возбуждаемых в МПЛП [9]. Свой вклад в искажения делает и несоответствие предполагаемых характеристик ЛП полученных реально из-за разброса параметров проводников и диэлектриков. Так, в работе [10] представлен яркий пример результата такого несоответствия, показывающий то, что значение характеристического импеданса межсоединения печатной платы, которое по вычислениям должно быть, например около 55 Ом, при измерениях может фактически оказаться равным 45 Ом или 65 Ом (рисунок 1.7).

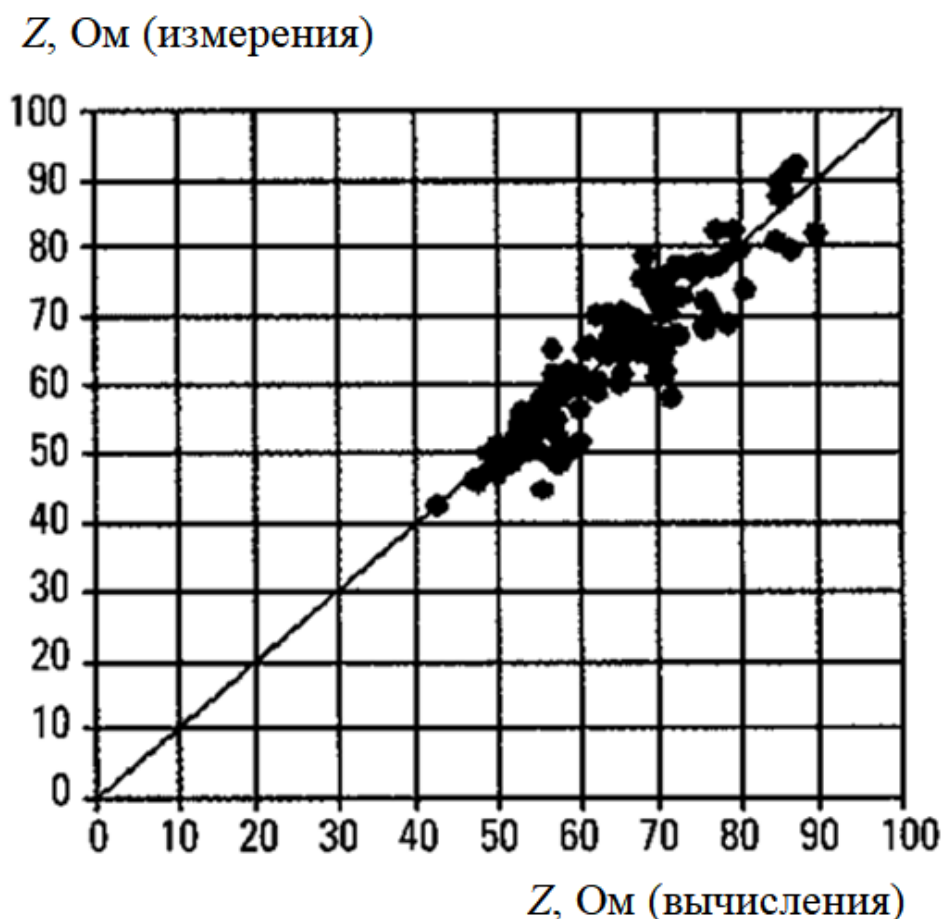


Рисунок 1.7 – Сравнение вычисленных и измеренных значений импеданса для 186 разных образцов тестовых линий различного поперечного сечения [9]

Сильное влияние на характеристики ПЛ оказывает диэлектрическое заполнение, особенно если оно неоднородно. Причина в том, что неоднородность диэлектрического заполнения неодинаково влияет на ёмкостные и индуктивные параметры межсоединений, соотношения которых, в свою очередь, определяют основные характеристики одиночных и связанных межсоединений. Именно неоднородность диэлектрического заполнения успешно используется исследователями для получения требуемых характеристик межсоединений в СВЧ-технике. Одним из примеров является слоистое диэлектрическое заполнение. Так, воздушные диэлектрические слои, позволяющие существенно уменьшить значение постоянной распространения и её дисперсию, а также получить нулевую чувствительность некоторых характеристик к изменениям геометрических параметров линий, широко используются в СВЧ-линиях передачи, например в

подвешенной и обращённой МПЛ с одной плоскостью земли [11] и в подвешенной ПЛ с двумя плоскостями земли [12].

Для надёжной работы РЭА необходим этап анализа тепловых режимов при её проектировании, из-за изменений температуры ( $T$ ) используемых электронных компонентов [13]. Материалы меняют свои физические размеры и свойства при изменении температуры, что препятствует получению стабильных значений характеристик МПЛ. Например, близка к данной тематике диссертация [14].

## 1.2 Подходы к моделированию характеристик полосковых линий

### 1.2.1 Многовариантный квазистатический анализ

Решение задачи анализа ПЛ возможно на основе двух подходов – электродинамического и квазистатического, в рамках которых применяют численные, аналитические и комбинированные методы [8]. Электродинамические численные методы, являясь универсальными, позволяют решать задачи с довольно сложной геометрией, однако при этом требования к быстродействию компьютера и объему его оперативной памяти могут оказаться чрезмерно высокими и, следовательно, задача будет невыполнимой. Квазистатические аналитические методы гораздо эффективнее при расчетах, дают приемлемую точность, позволяют физически осмысливать задачу и дают возможность решить задачи определения: матриц погонных параметров, собственных значений и отклика схемы линии передачи на заданное воздействие. В квазистатическом приближении анализ  $N$ -проводных структур основан на вычислении квадратных матриц (порядка  $N$ ) погонных коэффициентов параметров: погонных электростатической ( $\mathbf{C}$ ) и электромагнитной ( $\mathbf{L}$ ) индукции:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & -c_{12} & \cdots & -c_{1N} \\ -c_{21} & c_{22} & \cdots & -c_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -c_{N1} & -c_{N2} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ l_{N1} & l_{N2} & \cdots & l_{NN} \end{bmatrix}.$$

Если предполагается учет потерь, то вводятся еще две матрицы: погонных проводимостей ( $\mathbf{G}$ ) и погонных сопротивлений ( $\mathbf{R}$ ), которые вычисляются или определяются экспериментально.

Погонные параметры рассчитываются при известных допущениях, которым удовлетворяет подавляющее большинство структур ПЛ. Поэтому квазистатический подход представляет наибольший практический интерес. Конечно, он является приближенным, но в рамках своей применимости дает достаточную для практики точность, а также отличается высокой результативностью. При квазистатическом подходе предполагается, что в системе распространяются только поперечные квази-Т-волны, и анализ сводится к решению двухмерного уравнения Лапласа для заданной области поперечного сечения ПЛ с заданными граничными условиями.

Часто необходим многовариантный анализ рассматриваемой ПЛ в диапазоне параметров с целью получения набора значений, используемых для дальнейшего моделирования [15]. Данный тип анализа заключается в многократном повторении решения при варьировании внутренними и (или) внешними параметрами [16]. Типовыми процедурами многовариантного анализа, реализуемыми в системах автоматизированного проектирования (САПР), являются процедуры анализа чувствительности и статистического анализа.

### 1.2.2 Метод моментов

Математический метод получения матричных уравнений был назван методом моментов (Method of Moments, MoM) [17]. Общая теория MoM довольно проста. Рассматривается характеристическое операторное уравнение, для решения которого используют систему базисных функций в области определения оператора. Далее задается система весовых, или тестовых, функций в области значений оператора и берется скалярное произведение с каждой функцией, в результате чего получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которую можно записать в матричном виде. Если матрица СЛАУ

является невырожденной, то существуют обратная ей матрица и соответственно решение СЛАУ. Это решение может быть точным или приближенным в зависимости от выбора базисных и тестовых функций. Таким образом, одной из главных проблем при использовании МоМ для решения каждой конкретной задачи является выбор этих функций. Причем базисные функции должны быть линейно независимыми и такими, чтобы их суперпозиция могла хорошо аппроксимировать искомое решение. Тестовые функции также должны быть линейно независимыми. Кроме того, выбирая данные функции, необходимо учитывать следующие факторы: требуемая точность решения; легкость вычисления матричных элементов; размер матрицы, которую можно обработать; реализация хорошо обусловленной матрицы. Эффективность приложения метода для получения результата с заданной точностью определяется, в конечном счёте, затратами времени и памяти компьютера. При одновариантном анализе, решение методом моментов сводится к следующим шагам: получение из уравнений Максвелла интегральных уравнений структуры; дискретизация структуры (разбиение структуры на  $N$  подобластей, в каждой из которых искомая функция аппроксимируется базисными функциями); вычисление элементов матрицы СЛАУ порядка  $N$ ; вычисление элементов вектора воздействий размером  $N$ ; решение СЛАУ; вычисление требуемых характеристик из вектора решения СЛАУ.

Достоинства МоМ. Объект моделирования может иметь сложную форму. Высокая скорость вычислений при относительно невысоких требованиях к ресурсам ЭВМ. В частности, МоМ удобен для внешних задач (открытых геометрий) и для нескольких различных линейных и однородных сред. Метод моментов подходит для гибридизации с аналитическими и численными процедурами, такими как GTD/UTD (геометрическая теория дифракции/однородная теория дифракции), а также FMM и MLFMM (быстрый метод мультиполей и многоуровневый быстрый метод мультиполей) [18]. В отличие от МКР или МКЭ, МоМ требует дискретизации сеткой не объёма, а только поверхности, поэтому затраты на эту процедуру относительно малы.

Недостатки МоМ. Сложен для моделирования внутренних задач и неоднородных сред. Низкая скорость вычисления по сравнению с другими методами для объектов сравнительно простых конфигураций. Однако этого недостатка можно избежать, основываясь на том, что в настоящее время растет быстродействие ЭВМ и быстро развиваются математические методы решения, позволяющие ускорить процесс вычисления задач МоМ [19].

### 1.2.3 Модальный анализ

Интересный пример анализа, который здесь условно назван модальным, представлен в работе [5]. В ней рассмотрена структура, названная копланарной волноводной структурой с металлизацией снизу подложки (рисунок 1.8).

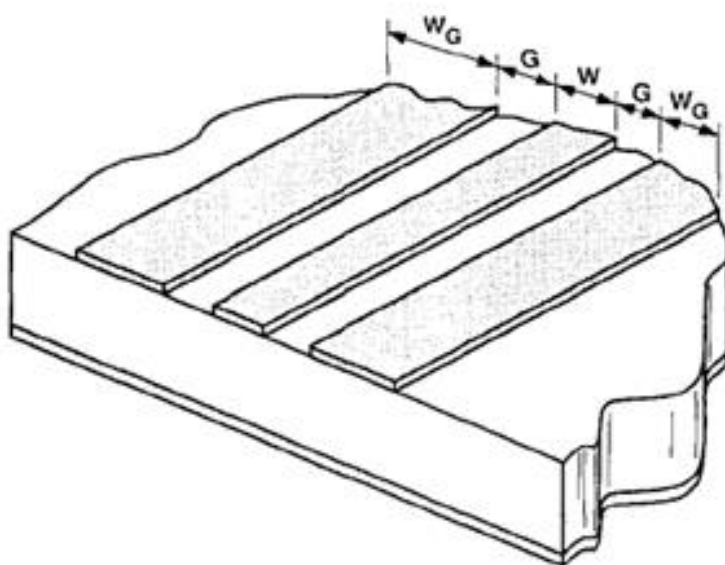


Рисунок 1.8 – Копланарная волноводная структура с металлизацией снизу подложки

Полоски на подложке ведут себя как три связанные МПЛ. Распространения мод в этой структуре не так просты, как нечетные и четные моды идеального копланарного волновода. Фактически, ни одна из мод этой структуры не позволяет обоим полигонам оставаться под нулевым потенциалом [20]. Это может

вызвать значительные проблемы в цепи, разработанной с такой линией. Три связанных МПЛ имеют 3 моды распространения. Каждая мода представлена вектором, имеющим 3 элемента, представляющие относительные потенциалы на трёх линиях [21]. Относительные потенциалы остаются такими же, когда мода распространяется вдоль линии. Это не так, если линия передачи возбуждается тремя произвольными напряжениями. Например, возбуждение представляет собой сигнал  $V_0$  на центральном проводнике с боковыми проводниками с нулевым потенциалом:

$$V_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Это не одна из мод структуры, а это означает, что отношения между тремя потенциалами на линии будут меняться по мере распространения возбуждения. Известны моды [5]

$$V_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, V_2 = \begin{pmatrix} a \\ 1 \\ a \end{pmatrix}, V_3 = \begin{pmatrix} -b \\ 1 \\ -b \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

$V_1$  – мода щелевой линии, что соответствует известной нечетной моде копланарного волновода на полубесконечной подложке. Мода щелевой линии обычно подавляется в большинстве приложений [22]. Две другие моды ( $V_2$  и  $V_3$ ) являются соответственно микрополосковой и копланарной. Эти моды включают параметры  $a$  и  $b$ , которые являются функциями физических размеров линии. В общем случае  $a \neq b$ , а фазовые скорости, связанные с этими модами, различны.

#### 1.2.4 Вычисление временного отклика полосковой линии

Широко используется вычисление временного отклика модифицированным методом узловых потенциалов. Так, в работах [23, 24] для анализа схем связанных



линий передачи с потерями и с произвольными линейными оконечными и соединительными схемами представлены результаты вычислений временного отклика данным методом. Полное описание такого вычисления временного отклика и его реализация представлены в [25].

### 1.2.5 Температурная модель

Современные САПР позволяют получить температурные поля, градиенты температур и плотности тепловых потоков в конструкции изделия. Однако это требует наличия специализированного программного обеспечения, знаний его алгоритмов и применения различных температурных моделей. Между тем для первых подходов к моделированию температуры можно использовать простую температурную модель вида  $P(T)$ , где  $P$  – какая-либо из характеристик структуры, а  $T$  – текущая температура окружающей среды. Модели термического расширения каждого из параметров вычисляются как

$$x=x_0(1+\alpha\Delta T), \quad (1.2)$$

где  $x$  – значение параметра линии с учетом термического расширения;  $x_0$  – исходное значение этого параметра;  $\alpha$  – коэффициент линейного термического расширения материала;  $\Delta T$  – разница температур.

Аналогично учтена температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости. Коэффициент  $\alpha_0$  получен следующим образом. На основе данных из работы [26] вычислен абсолютный коэффициент изменения  $\epsilon_r$  от  $T$  как

$$\alpha_0 = \frac{\epsilon_{r\max} - \epsilon_{r\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (1.3)$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – максимальное и минимальное из значений диапазона температур, а  $\epsilon_{r\max}$  и  $\epsilon_{r\min}$  – соответствующие им значения диэлектрической проницаемости.

### 1.3 Цель и задачи работы

На основании обзора, приведенного выше, можно отметить, что отсутствуют работы, детально исследующие возможности получения стабильных значений  $\tau$  и  $Z$  при нахождении боковых заземленных проводников на одном слое, а также для ряда более простых структур. Между тем такие исследования актуальны, поскольку они могут дать новые результаты для получения стабильных характеристик модифицированных МЛП.

Цель работы – использовать многовариантный квазистатический анализ для выявления возможностей уменьшения чувствительности характеристик модифицированных микрополосковых линий к изменению их параметров и температуры. Для её достижения необходимо решить такие задачи, как:

1. Обзор модификаций полосковых линий и подходов к их моделированию.
2. Анализ чувствительности характеристик модифицированных микрополосковых линий.
3. Анализ собственных значений и векторов произведения матриц  $L$  и  $C$  и временного отклика микрополосковых линий с заземленными проводниками.
4. Оценка влияния температуры на характеристики модифицированных микрополосковых линий.

## 2. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

Здесь представлены результаты исследования чувствительности характеристик модифицированных МПЛ [27–41].

### 2.1 Исследуемые модифицированные микрополосковые линии

Различные модификации МПЛ представлены на рисунках 2.1–2.3. Неизменными параметрами для линии из рисунка 2.1 являются: толщина полоски  $t=18$  мкм, толщина подложки  $h=1$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r=4,5$  (стеклотекстолит).

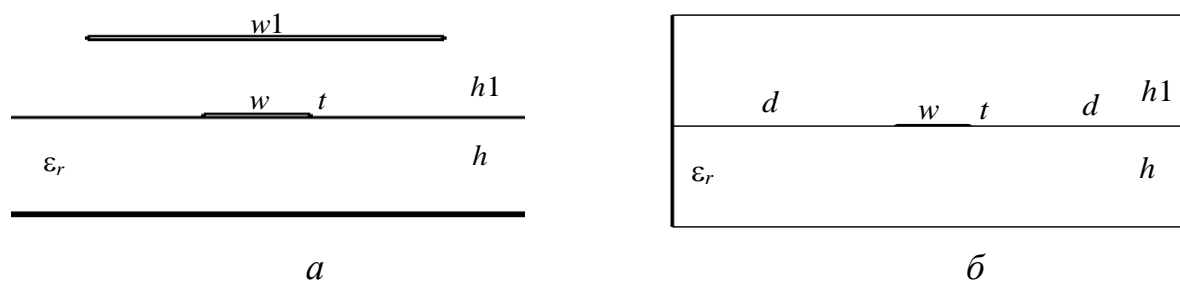


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения МПЛ, покрытой заземленным проводником (*a*) и экранированной (*б*)

Для структур из рисунков 2.2–2.3 выбраны следующие (близкие к типовым) значения параметров поперечного сечения: ширина сигнального проводника  $w=0,3$  мм, толщина сигнального и боковых заземленных проводников  $t=18$  мкм, ширина боковых проводников  $w1=1$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h=1$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r=4,5$ .

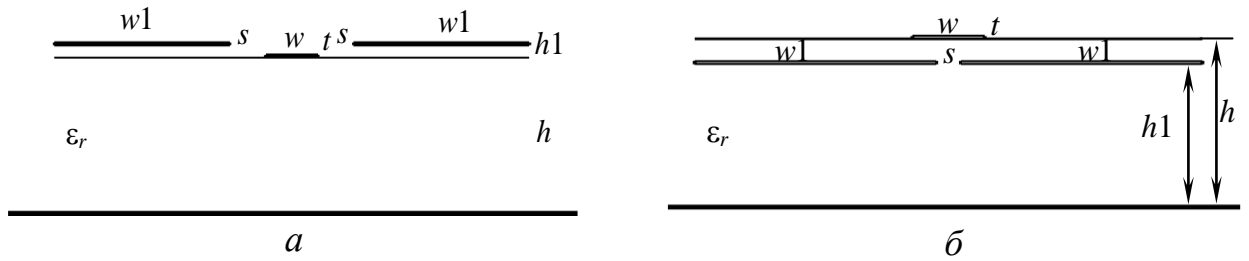


Рисунок 2.2 – Поперечные сечения МПЛ с боковыми заземлёнными проводниками сверху (а) и углубленными в подложку (б)

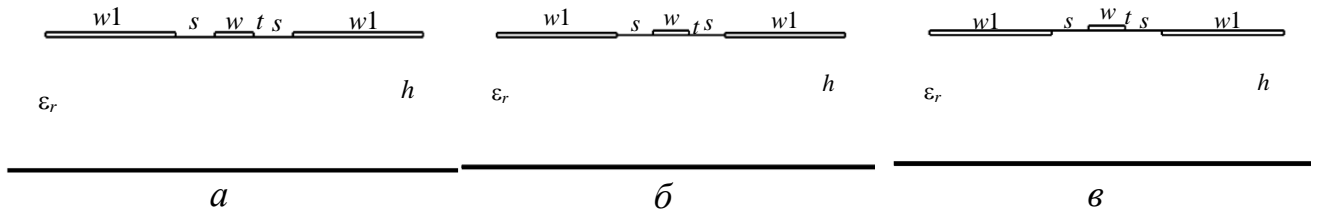


Рисунок 2.3 – Поперечные сечения МПЛ с боковыми заземленными проводниками над (а), посреди (б) и под (в) границей воздух–подложка

Значения характеристик  $\tau$  и  $Z$  исследуемых линий из рисунков 2.1–2.3 вычислены по известным формулам (2.1):

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

где  $v_0$  – скорость света в вакууме,  $C$  – погонная емкость линии,  $C_0$  – погонная емкость линии в вакууме. При этом в этом разделе боковые проводники полагались полностью под нулевым потенциалом земли, т.е. заземленными вдоль всей линии.

## 2.2 Анализ чувствительности характеристик покрытой заземленным проводником и экранированной микрополосковых линий

Выполнено моделирование в системе TALGAT. Для рисунка 2.1 зависимости  $\tau$  от высоты заземленного проводника над подложкой ( $h1$ ) при разных значениях ширины полоски ( $w$ ) представлены на рисунке 2.4 а. В середине диапазона (при  $h1=0,5-0,8$  мм) будет минимальная (вплоть до нулевой) чувствительность  $\tau$  к изменению  $w$ . Примечательно также уменьшение чувствительности  $\tau$  к изменению  $h1$  при уменьшении  $w$ . На рисунке 2.4 б

показаны соответствующие зависимости для  $Z$ . Они монотонно возрастают и не пересекаются.

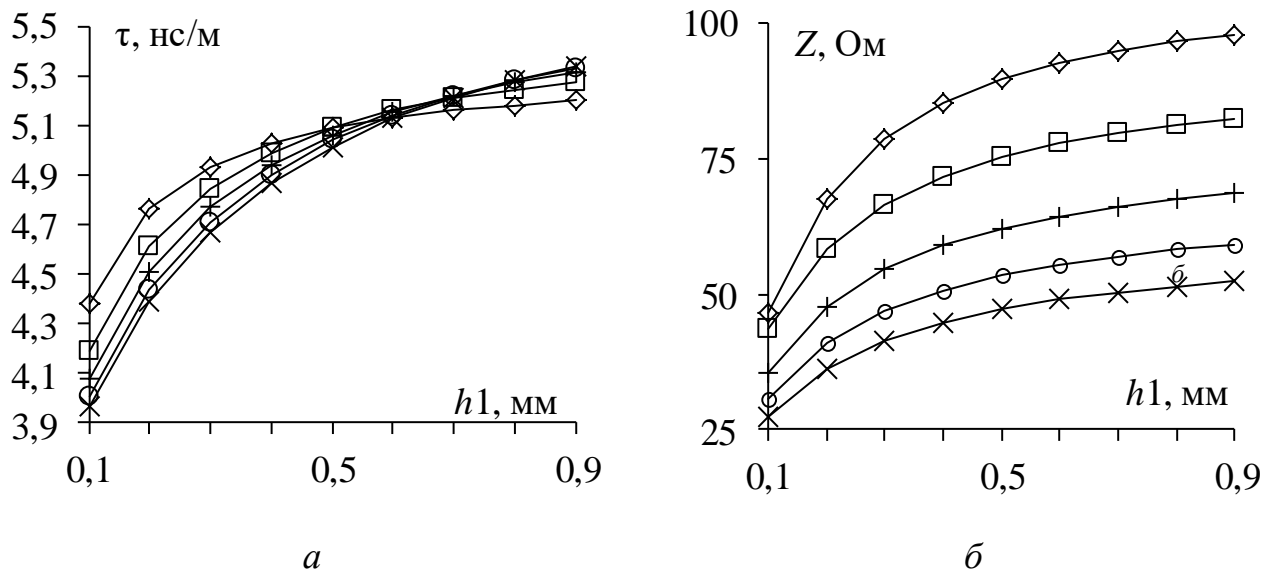


Рисунок 2.4 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h1$

при  $w=0,3$  ( $\diamond$ ),  $0,6$  ( $\square$ ),  $0,9$  ( $+$ ),  $1,2$  ( $\circ$ ) и  $1,5$  ( $\times$ ) мм для рисунка 2.1 а

Для рисунка 2.1 б предварительно моделировались характеристики на расстоянии от боковых стенок до полосы ( $d$ ) равном  $w$  для  $w=0,1$  мм для значений длины сегмента 10, 5, 2,5 и 1,25 мкм (при равномерной сегментации границ проводников и диэлектриков). Анализ результатов показал последовательное увеличение значения  $\tau$  на 0,4, 0,3 и 0,1 % и уменьшение значения  $Z$  на 0,7, 0,4 и 0,1 % соответственно. Последующие вычисления выполнены при длине сегмента 10 мкм, обеспечивающей приемлемую погрешность менее 0,70%. Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от высоты крышки над подложкой ( $h1$ ) при разных значениях  $w$  для расстояния от боковых стенок до полосы  $d=w$ ,  $3w$  представлены на рисунках 2.5 и 2.6. Анализ зависимостей показывает, что при изменении  $h1$  во всем диапазоне, когда полоска наиболее широкая ( $w=0,6; 0,9; 1,2; 1,5$  мм), значение  $\tau$  монотонно возрастает, а когда узкая ( $w=0,1; 0,2; 0,3$  мм) наблюдается нулевая чувствительность  $\tau$  к изменению  $h1$ , почти во всем диапазоне. Зависимости при  $w=0,6; 0,9; 1,2; 1,5$  мм пересекаются между собой в одной точке ( $h1=0,9$  мм), т.е. в этой точке будет нулевая чувствительность  $\tau$  к изменению  $w$ . При уменьшении  $w$  до 0,1 мм точка пересечения графиков

сдвигается к  $h1=0,2$  мм. На рисунках 2.5 б–2.6 б показаны соответствующие зависимости для  $Z$ . Они ведут себя аналогично зависимостям для  $\tau$ , показывая возможность нулевой чувствительности к изменениям  $h1$  и  $w$ . Этот факт важен для практики.

Рассмотрим влияние боковых стенок на вычисленные характеристики. Количественные оценки можно сделать из сравнения соответствующих графиков рисунок 2.7. Между тем сравнение с графиками для линии с такими же параметрами, только без боковых стенок, позволяет предположить, что именно наличие боковых стенок, за счет увеличения краевых емкостей, позволяет получить нулевую чувствительность в широком диапазоне значений  $h1$ .

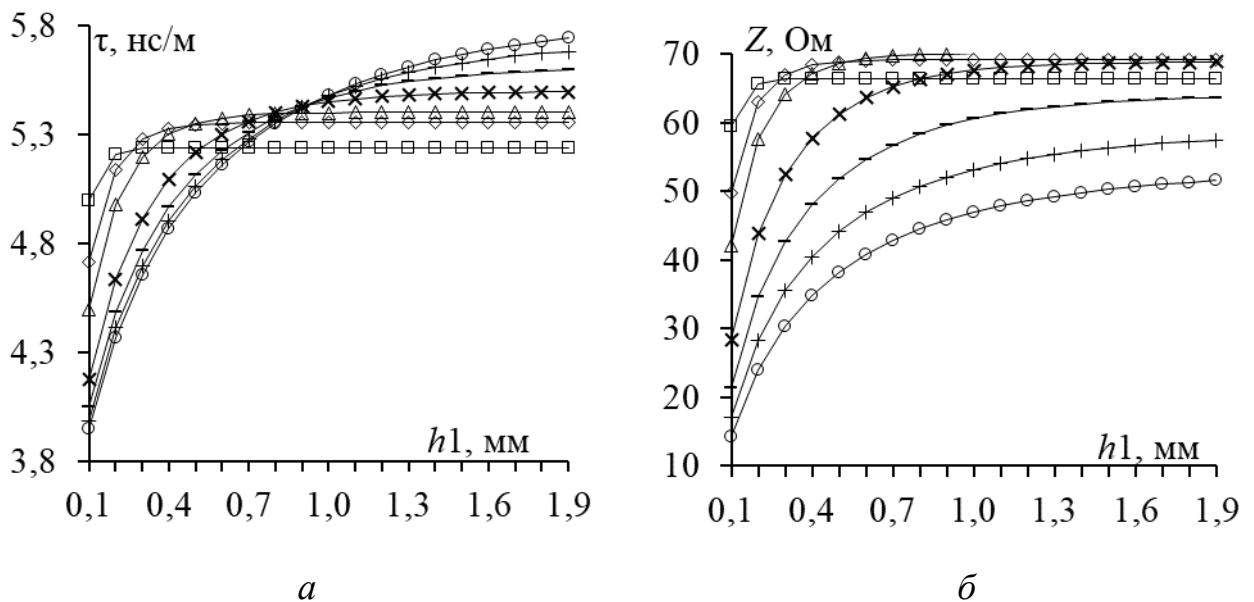


Рисунок 2.5 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h1$

при  $w=0,1$  ( $\square$ ),  $0,2$  ( $\diamond$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,6$  ( $\times$ ),  $0,9$  ( $\ominus$ ),  $1,2$  ( $+$ ) и  $1,5$  ( $\circ$ ) мм

при  $d=w$  для рисунка 2.1 б

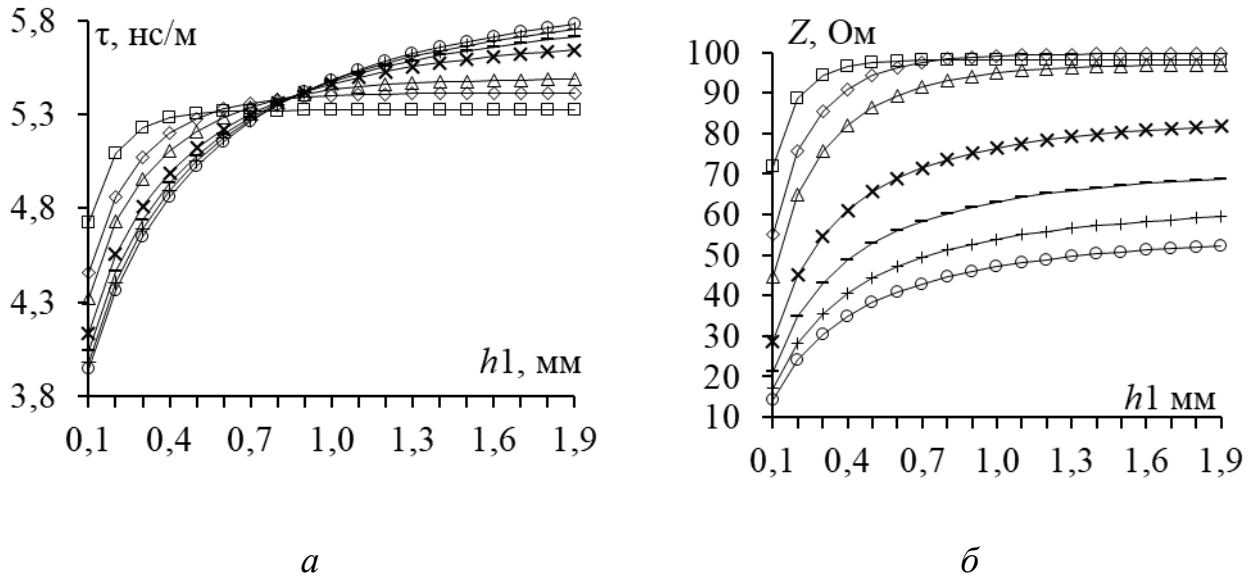


Рисунок 2.6 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h1$

при  $w=0,1$  ( $\square$ ),  $0,2$  ( $\diamond$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,6$  ( $\times$ ),  $0,9$  ( $\ominus$ ),  $1,2$  ( $+$ ) и  $1,5$  ( $\circ$ ) мм

при  $d=3w$  для рисунка 2.1 б

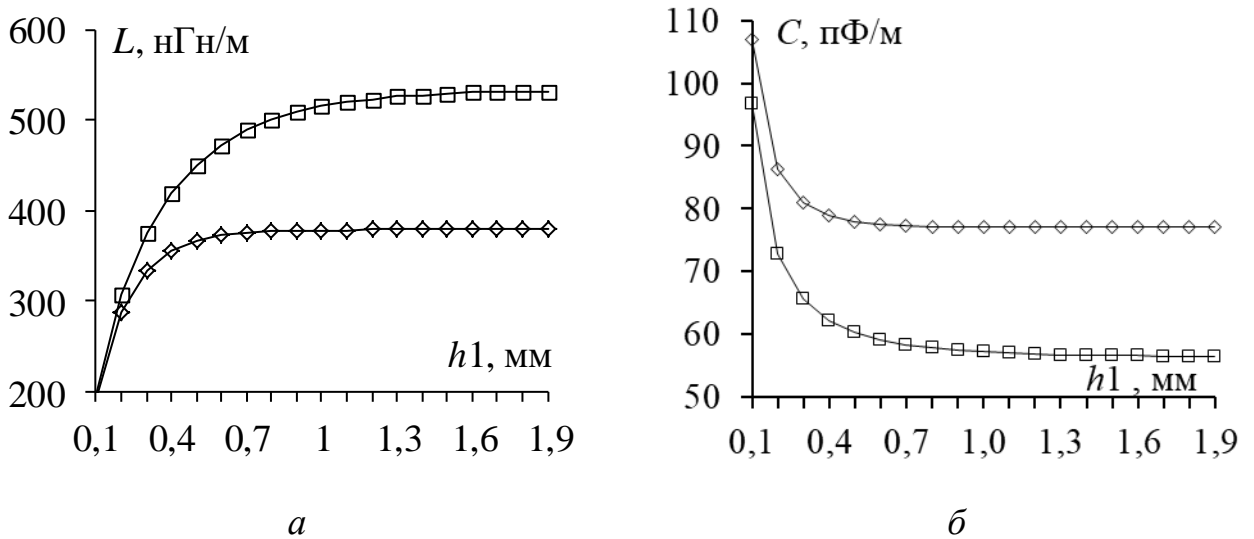


Рисунок 2.7 – Зависимости  $L$  (а) и  $C$  (б) от  $h1$  при  $w=0,3$  мм для  $d=w$  ( $\diamond$ ),  $3w$  ( $\square$ )

### 2.3 Анализ чувствительности характеристик микрополосковых линий с двумя боковыми заземленными проводниками

Рассмотрим результаты для различных модификаций МПЛ с боковыми заземленными проводниками (рисунки 2.2–2.3). В системе TALGAT построены геометрические модели поперечных сечений линии и методом моментов

вычислены матрицы (порядка  $3 \times 3$ ) погонных коэффициентов электростатической индукции, с учетом диэлектрика и без него.

Выполнены вычисления при изменении расстояния ( $2s+w$ ) между боковыми проводниками, расположенными в воздухе, для  $h_1=0,1-0,9$  мм (при длине сегмента 5 мкм для рисунка 2.2 а). Видно (рисунок 2.8), что при увеличении  $s$  значения  $\tau$  и  $Z$  плавно увеличиваются. При малых значениях  $h_1$  и  $s$  изменения  $\tau$  и  $Z$  более выражены, и рост  $h_1$  приводит к увеличению значений  $\tau$  и  $Z$ . Приближение боковых проводников к границе раздела воздух-подложка оказывает особое влияние на характеристики  $\tau$ : при малых значениях  $h_1$  характеристики пересекаются. Поэтому выполнено аналогичное вычисление для  $h_1=0,1-0,2$  мм с меньшим шагом 0,02 мм (рисунок 2.9). Видно аналогичное поведение зависимостей при малых  $s$ . Однако при  $s=0,5-0,9$  мм выявляется минимальная (близкая к нулевой) чувствительность  $\tau$  к изменению  $h_1$ , что можно использовать для получения стабильной задержки.

Для рисунка 2.2 б выполнены вычисления при изменении расстояния  $s$  между боковыми проводниками, углубленными в подложку, для высоты боковых проводников  $h_1=0,1-0,9$  мм (рисунок 2.10). Видно, что при увеличении  $s$  значение  $\tau$  плавно уменьшается, а  $Z$  – увеличивается. При малых значениях  $h_1$  изменения  $\tau$  и  $Z$  малы, однако рост  $h_1$  приводит к увеличению значения  $\tau$  и уменьшению значения  $Z$ , причем при малых значениях  $s$  изменения  $\tau$  и  $Z$  более выражены. Дополнительно выполнено моделирование с более мелким шагом у границы воздух-подложка: при  $h_1=0,8, 0,82, 0,84, 0,86, 0,88$  и  $0,9$  мм (рисунок 2.11). Анализ рисунка 2.11 показывает аналогичное поведение зависимостей, однако выявляет и его специфику. Она выражается в усилении влияния боковых проводников при их приближении к границе раздела воздух-подложка при малых значениях  $s$ . Так, при  $s=0,1$  мм значение  $\tau$  увеличивается от 5,56 до 5,82 нс/м. Примечательно, что при больших значениях  $s$  приближение боковых проводников к границе воздух-подложка не увеличивает, а уменьшает значения  $\tau$ . При  $s=0,6$  мм это уменьшение максимально: от 5,33 нс/м до 5,29 нс/м. При  $s=0,38$  мм изменение значения  $h_1$  почти не меняет значения  $\tau$ , а значит, возможна нулевая чувствительность  $\tau$  к



изменению  $h1$ . При этом изменением значения  $h1$  можно получить требуемое значение  $Z$  в диапазоне от 48 до 59 Ом.

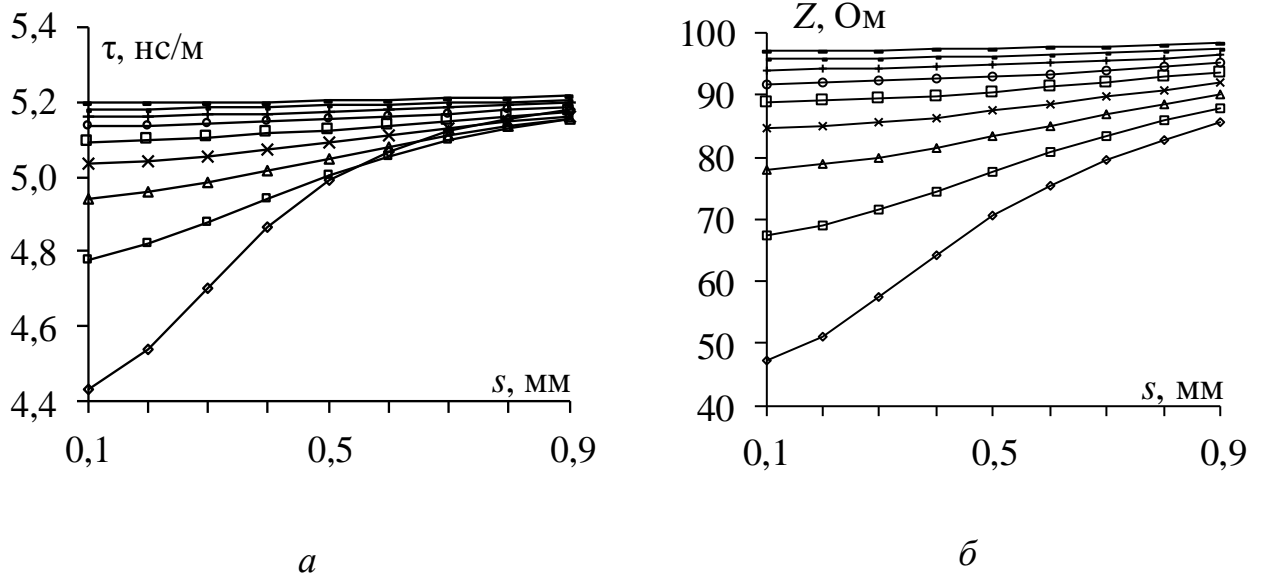


Рисунок 2.8 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$

при  $h1=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,4$  ( $\times$ ),  $0,5$  ( $\square$ ),  $0,6$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $+$ ),  $0,8$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $-$ ) мм для рисунка 2.2 а

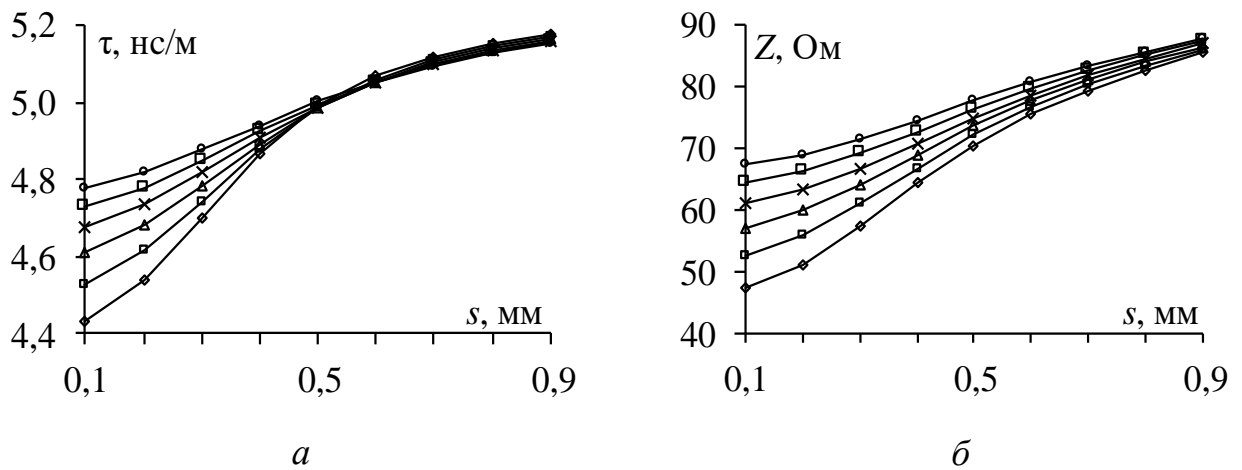


Рисунок 2.9 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$

при  $h1=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,12$  ( $\square$ ),  $0,14$  ( $\Delta$ ),  $0,16$  ( $\times$ ),  $0,18$  ( $\square$ ) и  $0,2$  ( $\circ$ ) мм для рисунка 2.2 а

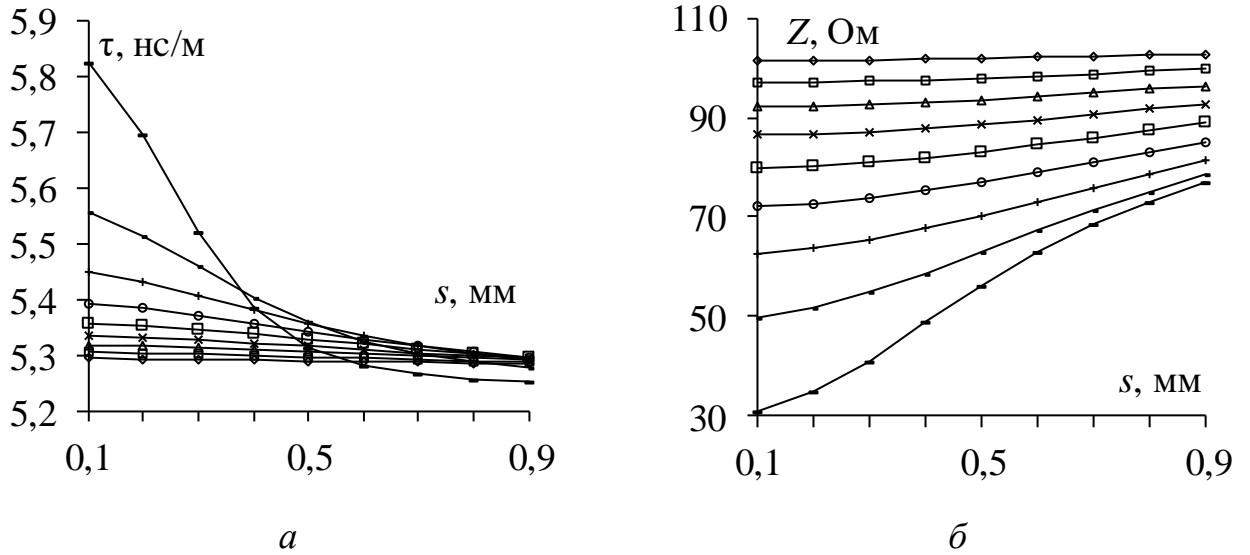


Рисунок 2.10 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$

при  $h_1=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,4$  ( $\times$ ),  $0,5$  ( $\square$ ),  $0,6$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $+$ ),  $0,8$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $-$ ) мм для рисунка 2.2 б

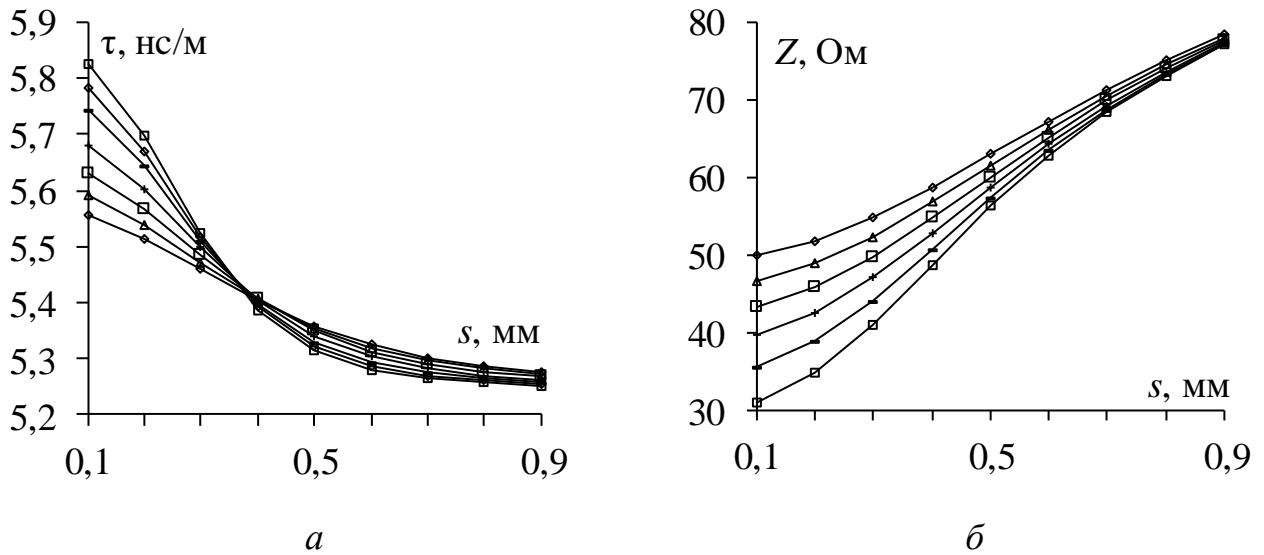


Рисунок 2.11 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$

при  $h_1=0,8$  ( $\diamond$ ),  $0,82$  ( $\Delta$ ),  $0,84$  ( $\square$ ),  $0,86$  ( $+$ ),  $0,88$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $\square$ ) мм для рисунка 2.2 б

Для рисунка 2.3 выполнены вычисления при изменении разноса проводников  $s$ . При увеличении  $s$  значения  $\tau$  и  $Z$  плавно увеличиваются, однако изменение  $\tau$  гораздо меньше (рисунок 2.12 а). Углубление заземленных проводников уменьшает чувствительность  $\tau$  к изменению  $s$ . Изменение  $\tau$  во всем диапазоне  $s$  менее 2%. Можно предположить, что при определенных параметрах МПЛ чувствительность может быть снижена до нуля. В этой связи дополнительно

к  $t=18$  мкм вычислены значения  $\tau$  и  $Z$  для типовых значений толщины проводников ( $t=35, 70$  и  $105$  мкм) при изменении  $s$  (рисунки 2.13–2.15). Рассмотрим сначала графики для  $\tau$ . При увеличении  $s$  значение  $\tau$  плавно увеличивается, но не во всех случаях. Так, углубление заземленных проводников уменьшает чувствительность  $\tau$  к изменению  $s$ , причем всё сильнее, с ростом толщины проводников, вплоть до нулевой чувствительности  $\tau$ . Можно предположить, что при определенных параметрах МПЛ чувствительность может быть снижена почти до нуля в широком диапазоне значений  $s$ . Например, значение  $\tau$  для рисунка 2.3 б при  $t=35$  мкм изменяется лишь на 0,8%. Показательны, например, и графики для  $\tau$  при  $t=105$  мкм, поскольку график для  $\tau$ , с углублением боковых проводников, превращается из монотонно возрастающего в монотонно убывающий. Очевидно, что существует такое значение углубления проводников, при котором график для  $\tau$  будет почти горизонтальной прямой в максимальном диапазоне значений  $s$ . Анализ графиков для  $Z$  показывает незначительное влияние положения боковых проводников. Тем самым, появляется возможность выбором параметров линии получить требуемое значение  $Z$  при минимальной чувствительности  $\tau$  к изменению  $s$ .

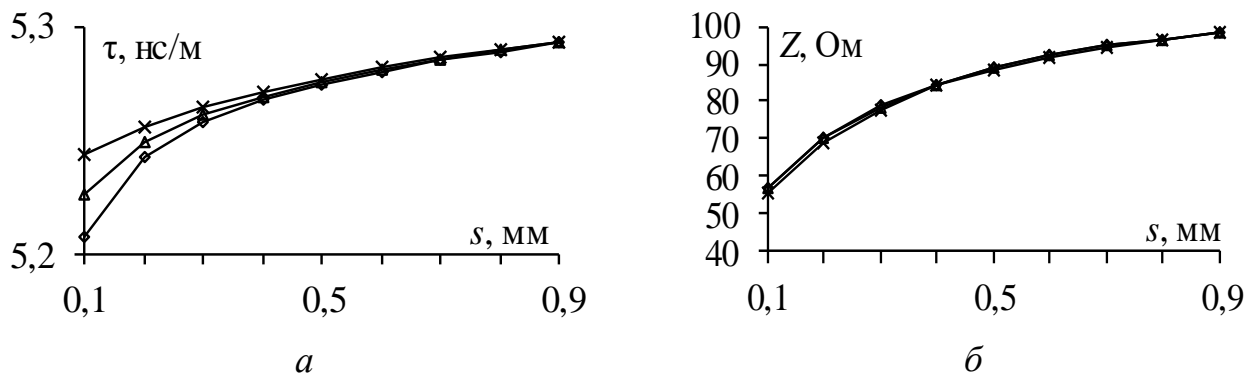


Рисунок 2.12 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$  для рисунков 2.3 а ( $\diamond$ ), б ( $\Delta$ ), в ( $\times$ ) при  $t=18$  мкм

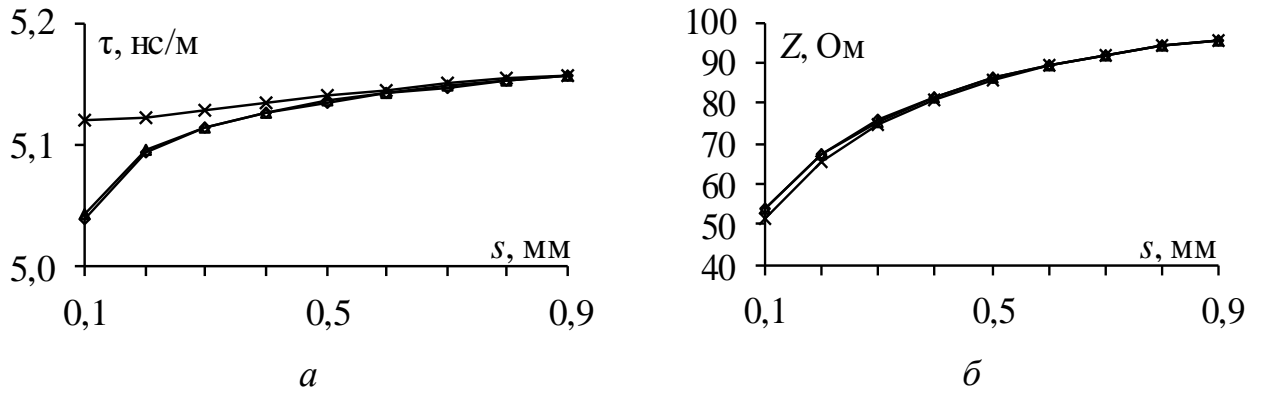


Рисунок 2.13 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$  для рисунков 2 а ( $\diamond$ ), б ( $\Delta$ ), в ( $\times$ )  
при  $t=35 \mu\text{м}$

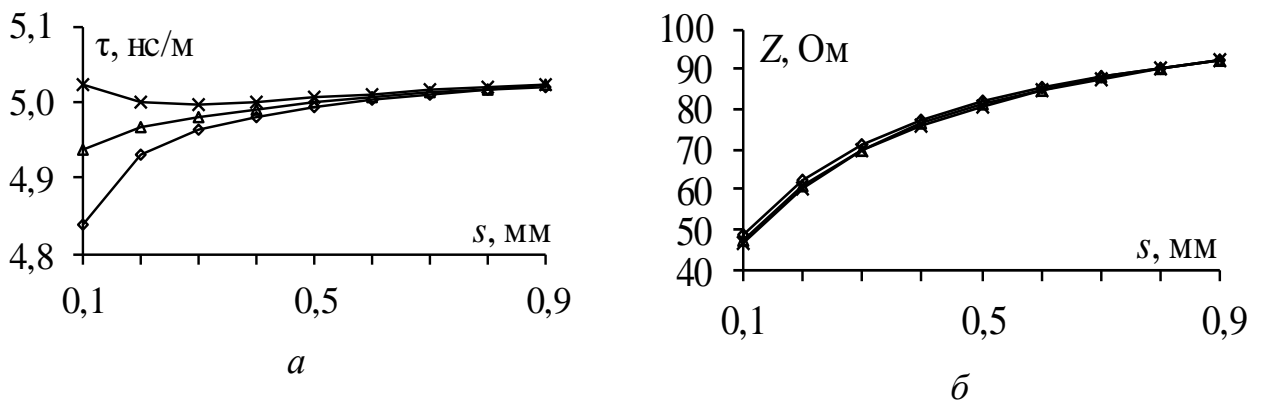


Рисунок 2.14 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$  для рисунков 3 а ( $\diamond$ ), б ( $\Delta$ ), в ( $\times$ )  
при  $t=70 \mu\text{м}$

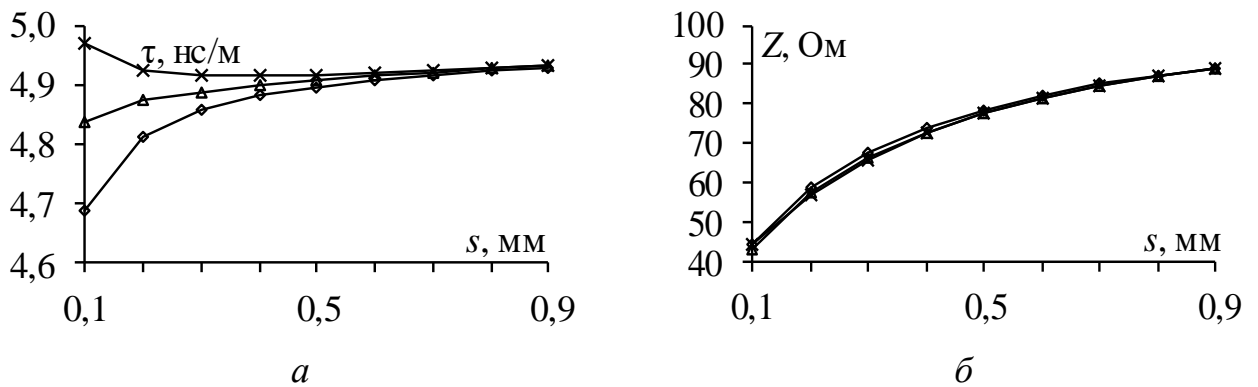


Рисунок 2.15 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$  для рисунков 3 а ( $\diamond$ ), б ( $\Delta$ ), в ( $\times$ )  
при  $t=105 \mu\text{м}$

## 2.4 Основные результаты раздела и выводы

Представлены систематизированные результаты исследования значений  $\tau$  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  $h_1$ . На программу для моделирования последней структуры получено свидетельство [30].

Для МПЛ с боковыми заземленными проводниками можно отметить, что приближение боковых проводников к границе воздух-подложка оказывает особое влияние на исследуемые характеристики. В частности, появляется возможность выбором параметров линии получить требуемое значение  $Z$  при минимальной чувствительности  $\tau$  изменению  $s$ . Кроме того, выявлена возможность нулевой чувствительности.

### 3. АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И ВЕКТОРОВ ПРОИЗВЕДЕНИЯ МАТРИЦ $L$ И $C$ И ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ С ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ

Здесь представлен сравнительный анализ результатов квазистатического моделирования собственных значений и векторов произведения матриц  $L$  и  $C$  и временного отклика микрополосковых структур с заземленными проводниками в диапазоне параметров [42–45]. Анализ выполнен при изменении высоты заземленных проводников ( $h_1$ ), толщины фольги ( $t$ ) и расстояния между проводниками ( $s$ ).

#### 3.1 Моделируемые схемы

Для всех структур (длиной  $l=1$  м) использовались принципиальные электрические схемы при сопротивлениях 50 Ом на концах активного проводника и заземленных концах других проводников для структур с одним проводником сверху (рисунок 3.1 *а*) и двумя проводниками (рисунок 3.1 *б*).

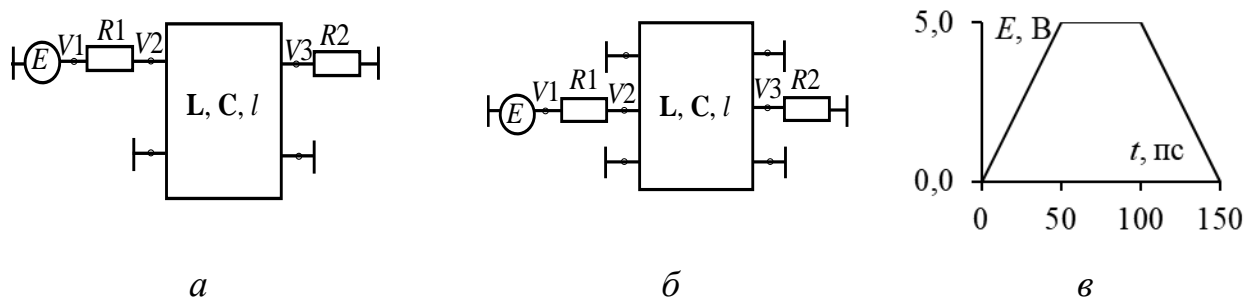


Рисунок 3.1 – Моделируемые принципиальные схемы для структур с проводником сверху (*а*) и двумя проводниками (*б*) и форма воздействующей ЭДС (*в*)

В структурах с двумя проводниками на схеме проводник 2 – центральный (сигнальный), а 1 и 3 – два других. Сигнальный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС  $E$  и

внутренним сопротивлением  $R1$ . На другом конце проводник соединен с  $R2$ . В структуре с проводником сверху проводник 1 – сигнальный, а 2 – верхний. Входное воздействие для всех случаев представляет собой трапецевидный импульс с амплитудой ЭДС 5 В и временами нарастания, плоской вершины и спада по 50 пс (рисунок 3.1 в). Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Далее представлено сравнение результатов, полученных двумя способами. Первый способ представлен погонной задержкой ( $\tau_0$ ), вычисленной по (2.1), полагая проводники заземленными полностью. Второй способ представлен погонными задержками мод ( $\tau_1, \tau_2$ ), вычисленными как квадратный корень из собственных значений произведения матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ , и соответствующими собственными векторами, а также откликами, полагая проводники заземленными только на концах.

### 3.2 Микрополосковая линия, покрытая заземленным проводником

Здесь представлены результаты для рисунка 3.2 а.

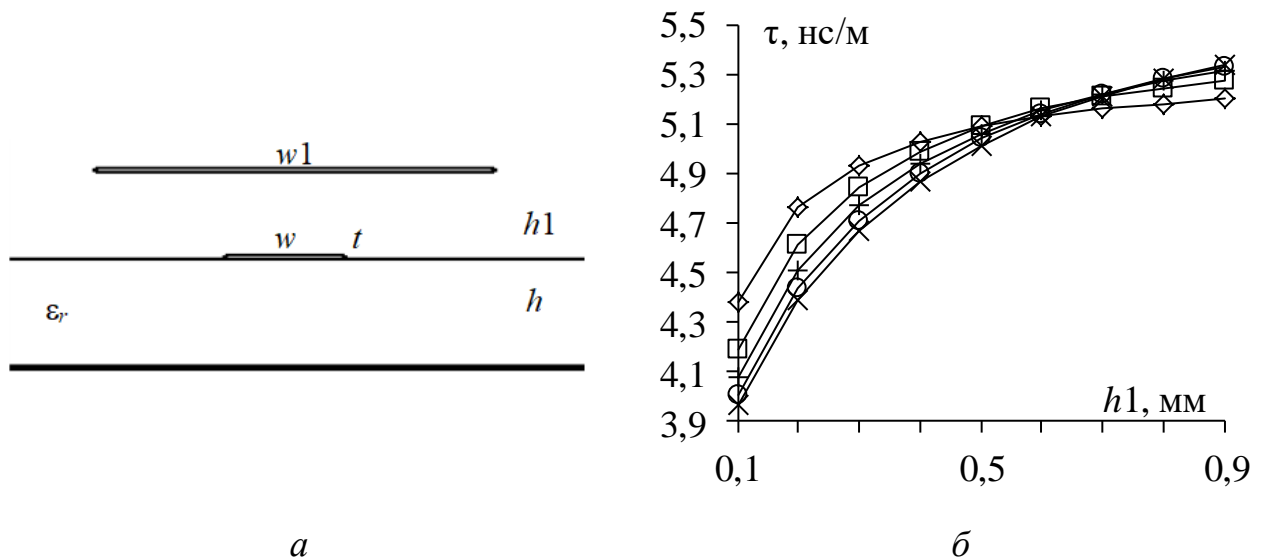


Рисунок 3.2 – Поперечное сечение МПЛ с проводником сверху (а) и зависимости  $\tau$  от  $h1$  при  $w=0,3$  ( $\diamond$ ),  $0,6$  ( $\square$ ),  $0,9$  ( $+$ ),  $1,2$  ( $\circ$ ) и  $1,5$  ( $\times$ ) мм (б)

Для сравнения влияния проводника оба вычисления выполнены при  $h1=0,1-0,9$  мм и при изменении  $w$  от 0,3 мм до 1,5 мм с шагом 0,3 мм. По полученным результатам для  $w=0,3$  мм (рисунок 3.3) видно, что с увеличением  $h1$  значения  $\tau_0$  и  $\tau_2$  возрастают, а  $\tau_1$  – убывают. Таким образом, вместо одной погонной задержки (при полностью заземленном проводнике), появляются две, причем больше и меньше прежней, с ростом их разности при росте высоты проводника.

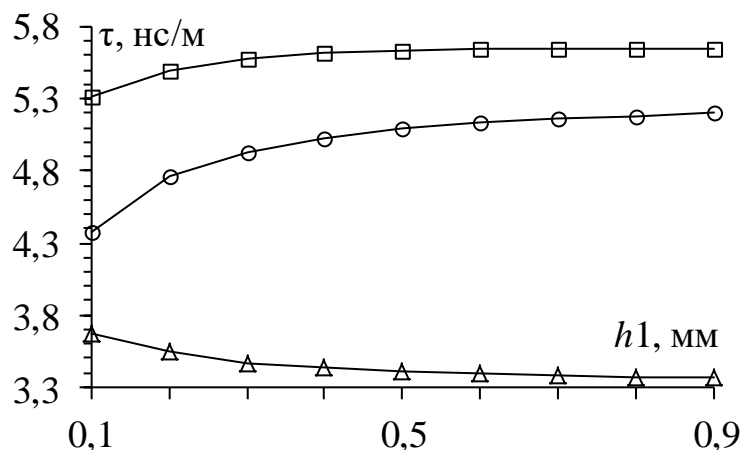


Рисунок 3.3 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (Δ) и  $\tau_2$  (□) от  $h1$  при  $w=0,3$  мм

Каждой из погонных задержек мод соответствует свой собственный вектор напряжений, значения элементов которого представлены на рисунке 3.4. Как видно, они слабо меняются с ростом  $h1$ .

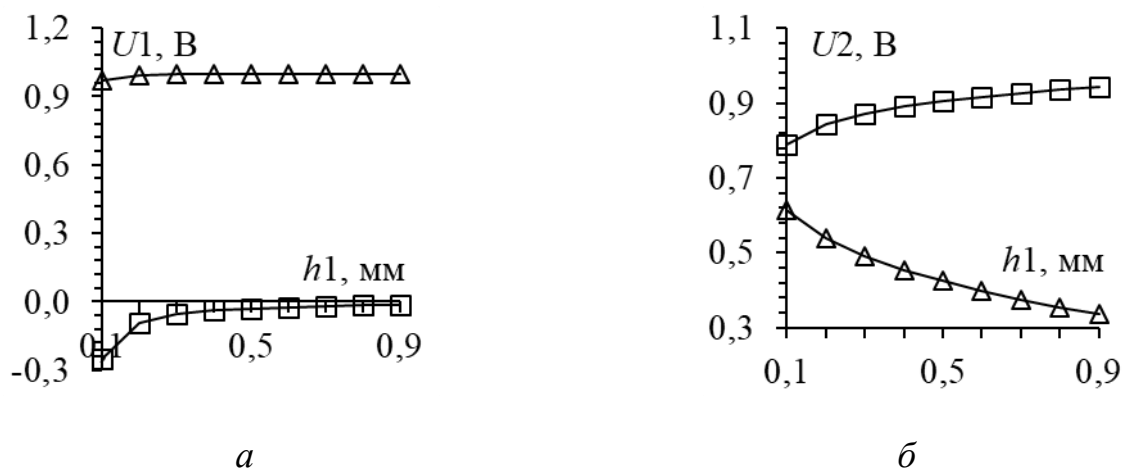


Рисунок 3.4 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $h1$  при  $w=0,3$  мм для  $\tau_1$  (а) и  $\tau_2$  (б)

Между тем рассматриваемое воздействие только на сигнальный проводник приведёт к суперпозиции напряжений каждой из мод, причём с учётом



коэффициентов передачи на ближнем и дальнем концах структуры, которые определяются граничными условиями на этих концах и волновым сопротивлением моды. Поэтому, для определения напряжения на выходе, лучше вычислить временной отклик на воздействие импульса.

На рисунке 3.5 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $h1=0,1-0,9$  мм для  $w=0,3$  мм. Видно, что СКИ разлагается на 2 импульса. С увеличением  $h1$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,78 В до 2,01 В, а первого – уменьшается с 1,7 В до 0,17 В. Таким образом, возможно их равенство (при значении  $h1$  между 0,1 и 0,2 мм).

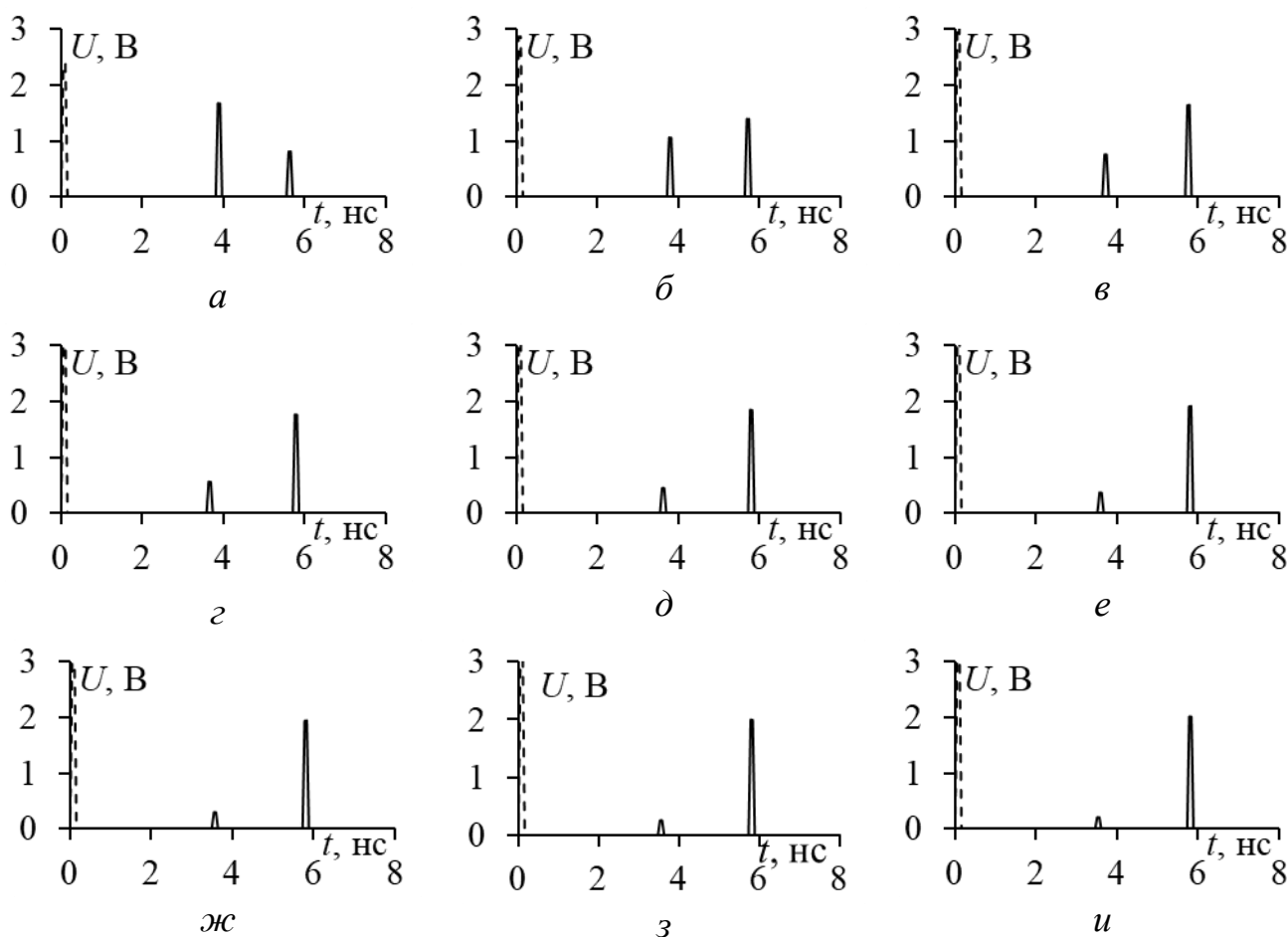


Рисунок 3.5 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) при  $h1=0,1$  (а), 0,2 (б), 0,3 (в), 0,4 (г), 0,5 (д), 0,6 (е), 0,7 (ж), 0,8 (з) и 0,9 (и) для  $w=0,3$  мм

Принципиальное значение для искажения импульса, из-за его разложения на импульсы двух мод имеет разность их погонных задержек  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Для количественной оценки удобно использовать относительное отклонение,

выраженное отношением модуля этой разности к погонной задержке  $\tau_0$ , в процентах (таблица 3.6). Как видно, отклонение значительно (до 35%).

Таблица 3.1 – Отклонения  $\tau$  при  $w=0,3$  мм

$h1$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	34	23	18	15	13	11	10	10	9
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	15	23	28	30	32	33	34	35	35

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены аналогичные зависимости для  $w=0,6$  мм. Изменения незначительны.

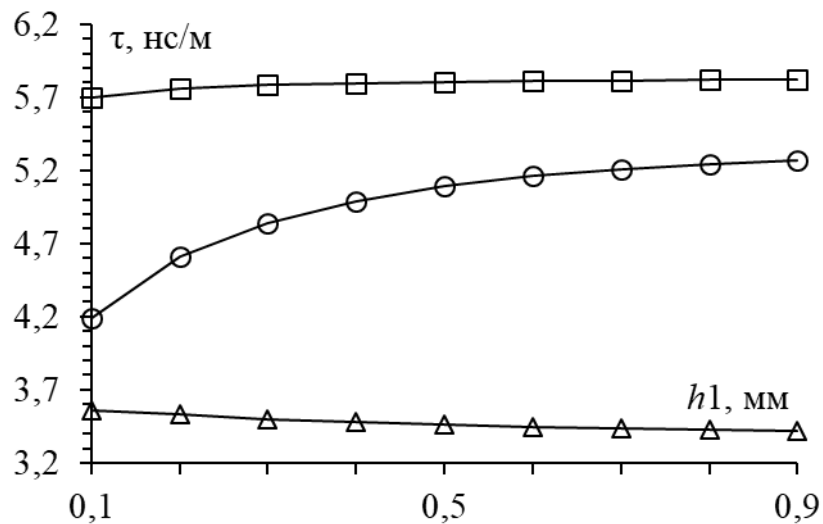


Рисунок 3.6 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (Δ) и  $\tau_2$  (□) от  $h1$  при  $w=0,6$  мм

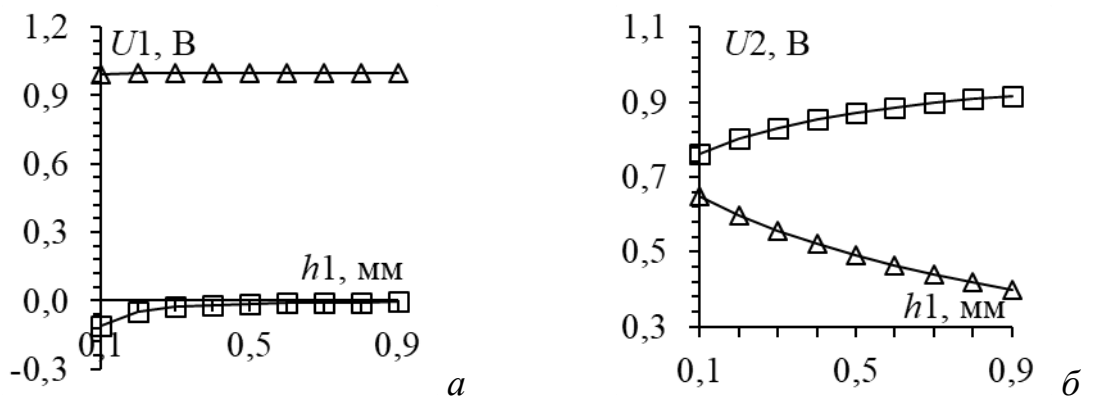


Рисунок 3.7 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $h1$  при  $w=0,6$  мм для  $\tau_1$  (а) и  $\tau_2$  (б)

На рисунке 3.8 представлены отклики для  $w=0,6$  мм. С увеличением  $h1$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,67 В до 2,12 В, а первого – уменьшается от 1,58 В до 0,22 В.

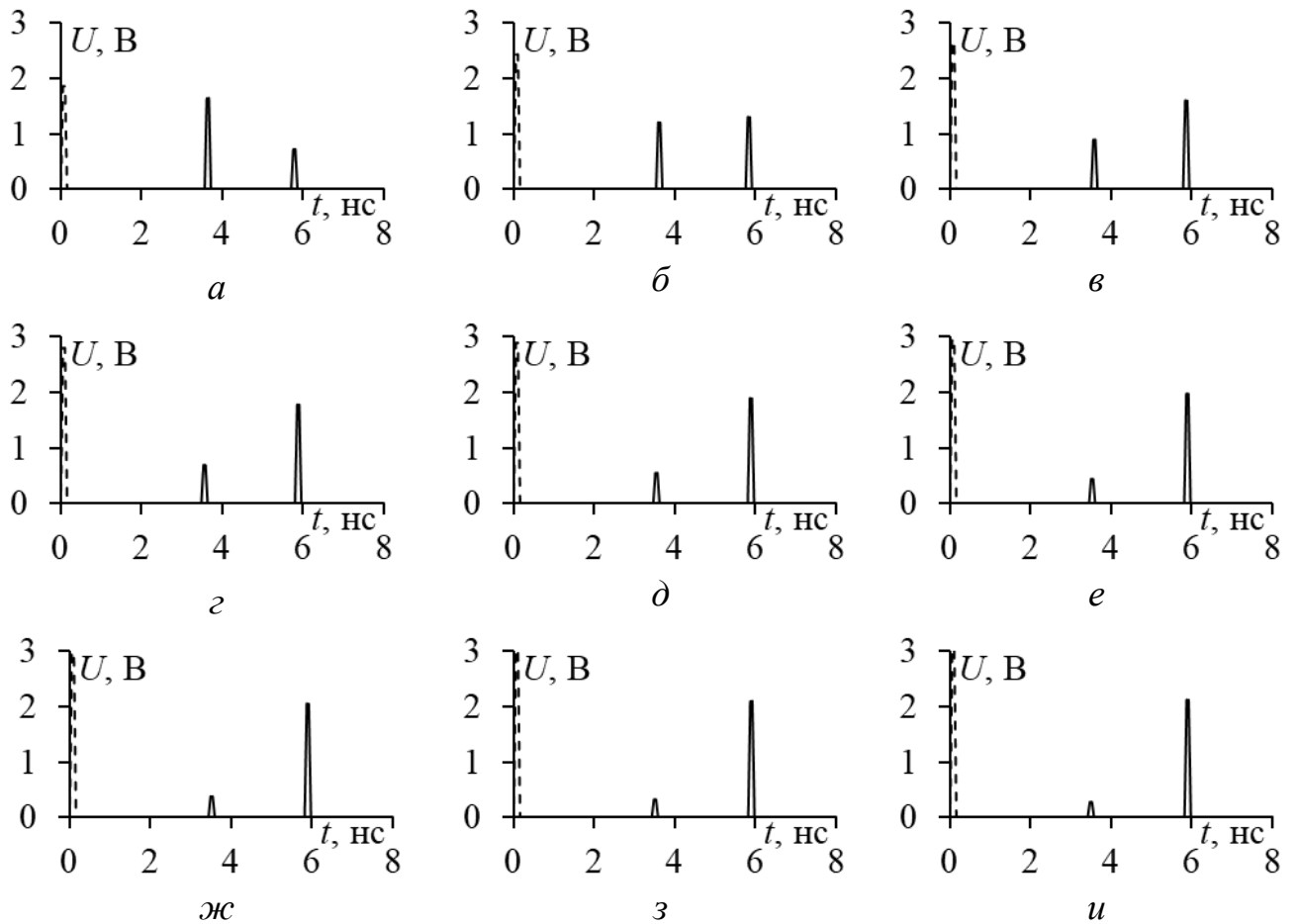


Рисунок 3.8 – Формы напряжения на входе (- -) и выходе (—) при  $h1=0,1$  (а), 0,2 (б), 0,3 (в), 0,4 (г), 0,5 (д), 0,6 (е), 0,7 (ж), 0,8 (з) и 0,9 (и) для  $w=0,6$  мм

В таблице 3.2 представлены отклонения  $\tau$  для  $w=0,6$  мм. Они несколько меньше.

Таблица 3.2 – Отклонения  $\tau$  при  $w=0,6$  мм

$h1$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	24	16	13	12	11	10	9	9	9
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	12	22	26	29	31	32	32	33	34

На рисунках 3.9 и 3.10 представлены аналогичные зависимости для  $w=0,9$  мм. Значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  практически стабильны.

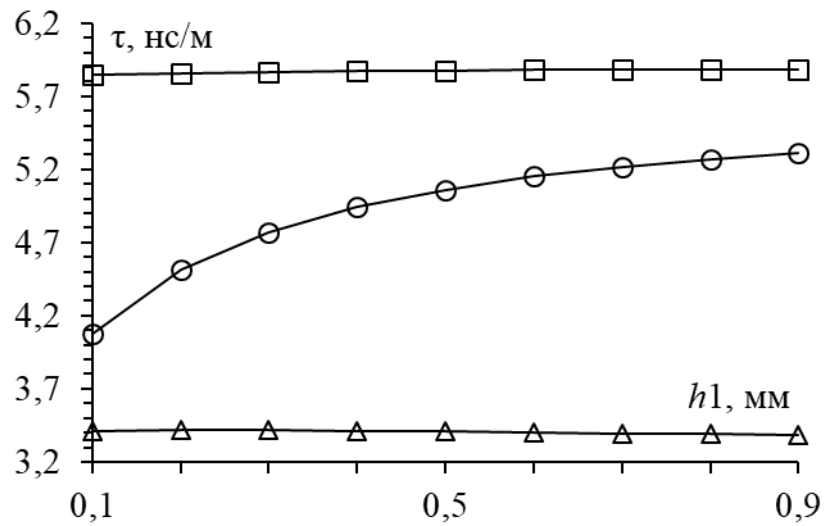


Рисунок 3.9 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (△) и  $\tau_2$  (□) от  $h_1$  при  $w=0,9$  мм

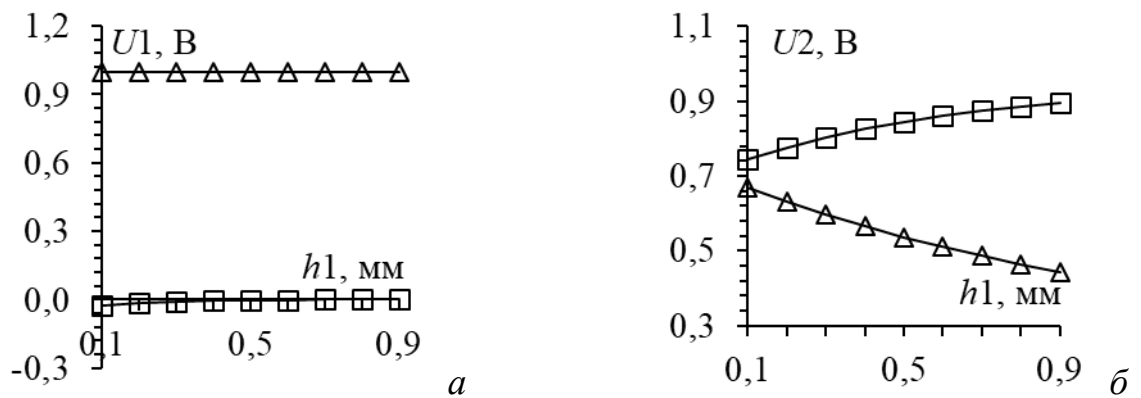


Рисунок 3.10 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $h_1$  при  $w=0,9$  мм для  $\tau_1$  (а) и  $\tau_2$  (б)

На рисунке 3.11 представлены отклики для  $w=0,9$  мм. С увеличением  $h_1$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,60 В до 2,15 В, а первого – уменьшается от 1,51 В до 0,20 В.

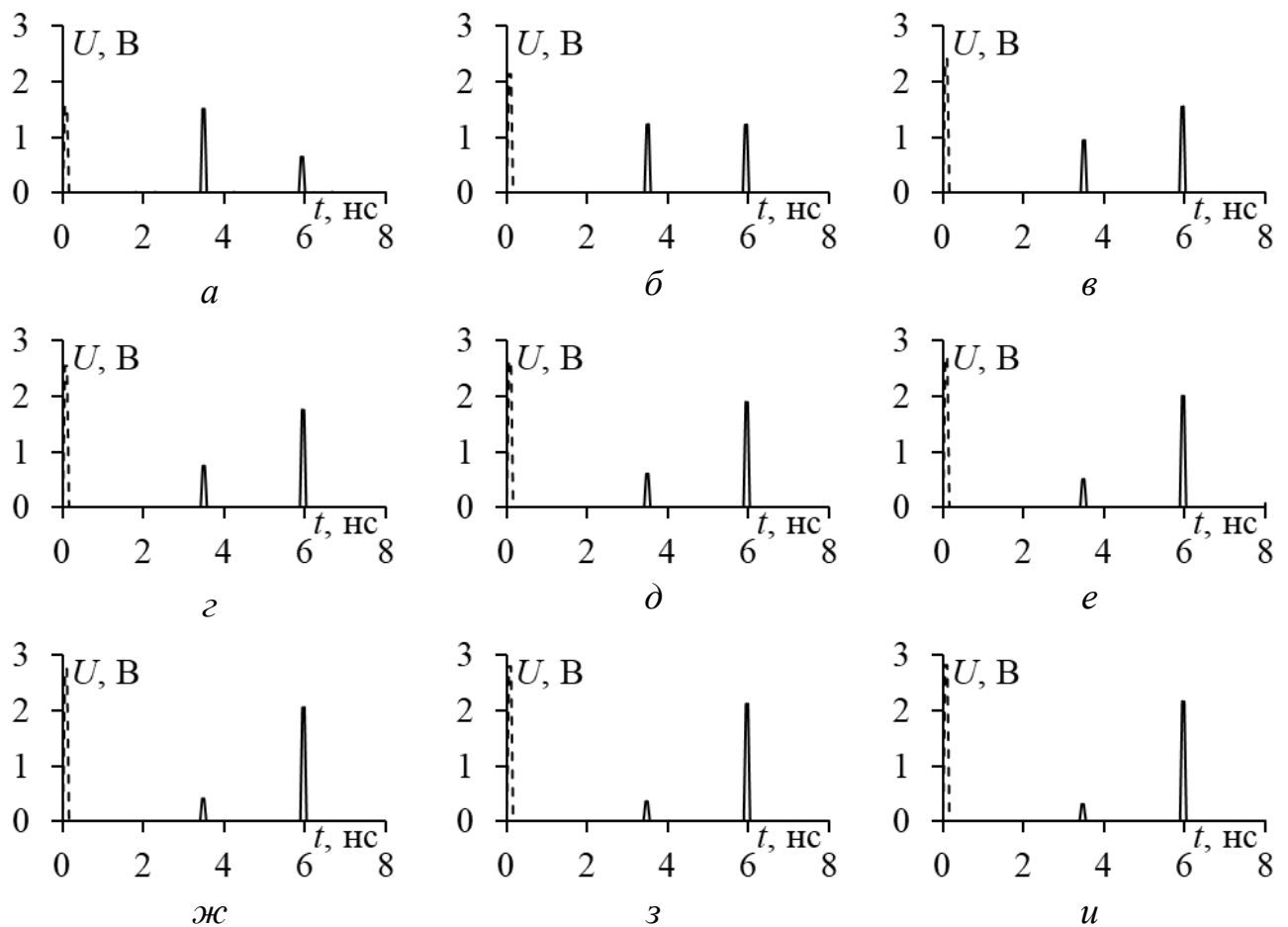


Рисунок 3.11 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $h1=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $w=0,9$  мм

В таблице 3.3 представлены отклонения  $\tau$  для  $w=0,9$  мм. Они увеличиваются до 42%.

Таблица 3.3 – Отклонения  $\tau$  при  $w=0,9$  мм

$h1$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0)*100\%$	42	29	22	18	15	13	12	11	10
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0)*100\%$	17	24	28	31	33	34	35	36	36

На рисунках 3.12 и 3.13 представлены аналогичные зависимости для  $w=1,2$  мм. Изменения незначительны.

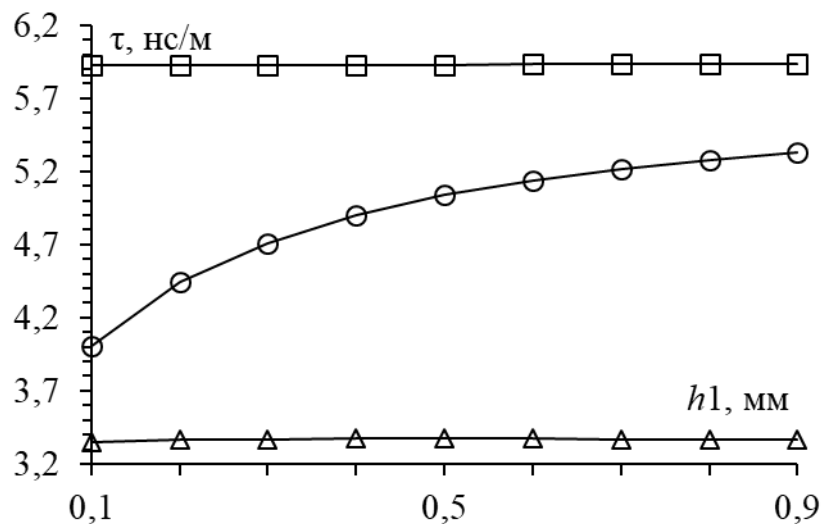


Рисунок 3.12 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_2$  ( $\square$ ) от  $h_1$  при  $w=1,2$  мм

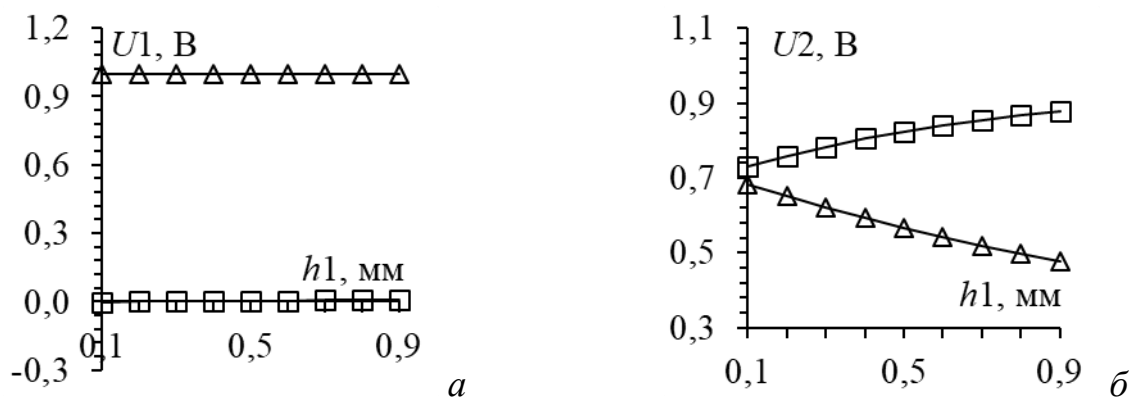


Рисунок 3.13 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $h_1$  при  $w=1,2$  мм для  $\tau_1$  (а) и  $\tau_2$  (б)

На рисунке 3.14 представлены отклики для  $w=0,9$  мм. С увеличением  $h_1$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,62 В до 2,19 В, а первого – уменьшается от 1,40 В до 0,22 В.

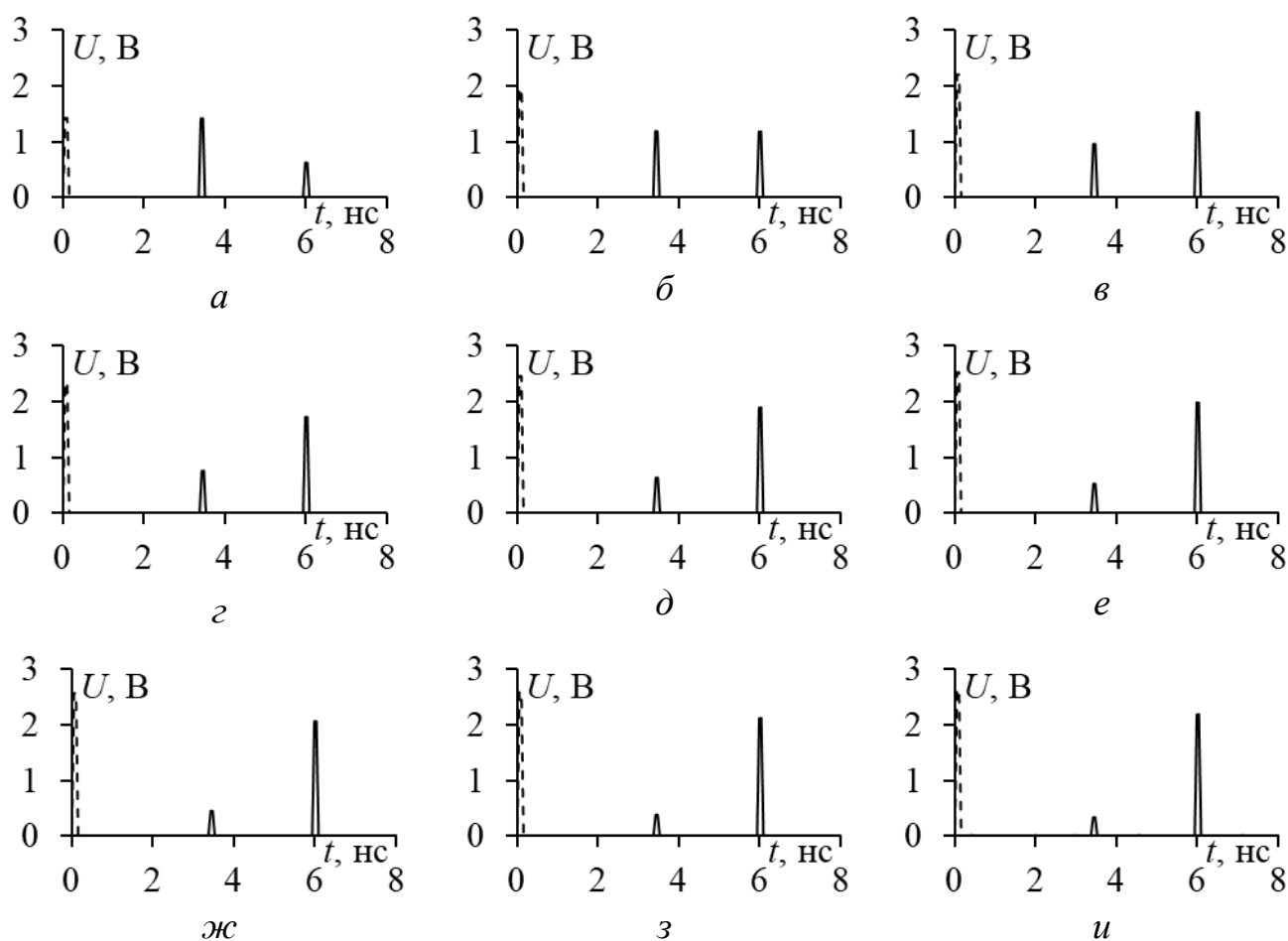


Рисунок 3.14 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $h1=0,1$  (*a*),  $0,2$  (*б*),  $0,3$  (*в*),  $0,4$  (*г*),  $0,5$  (*д*),  $0,6$  (*е*),  $0,7$  (*ж*),  $0,8$  (*з*) и  $0,9$  (*и*) для  $w=1,2$  мм

В таблице 3.4 представлены отклонения  $\tau$  для  $w=1,2$  мм. Они увеличиваются до 47%.

Таблица 3.4 – Отклонения  $\tau$  при  $w=1,2$  мм

$h1$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	47	33	26	20	17	15	13	12	11
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	16	24	28	31	33	34	35	36	37

На рисунках 3.15 и 3.16 представлены аналогичные зависимости для  $w=1,5$  мм. Изменения незначительны.

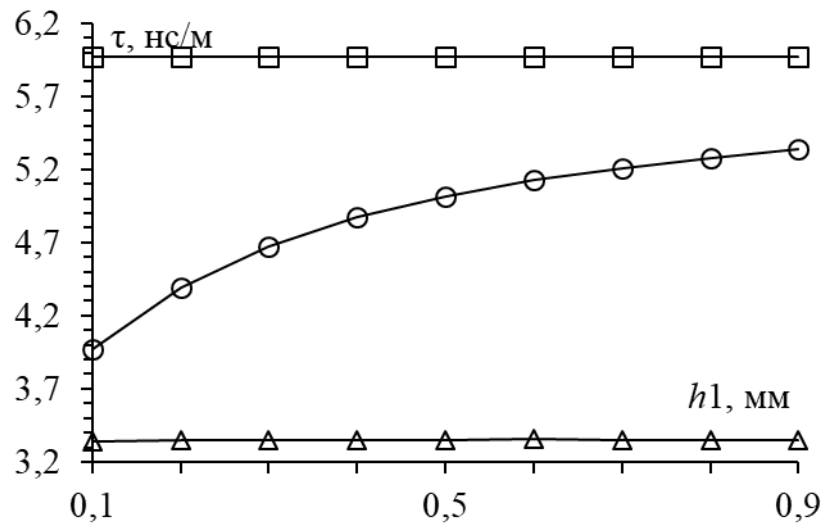


Рисунок 3.15 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_2$  ( $\square$ ) от  $h_1$  при  $w=1,5$  мм

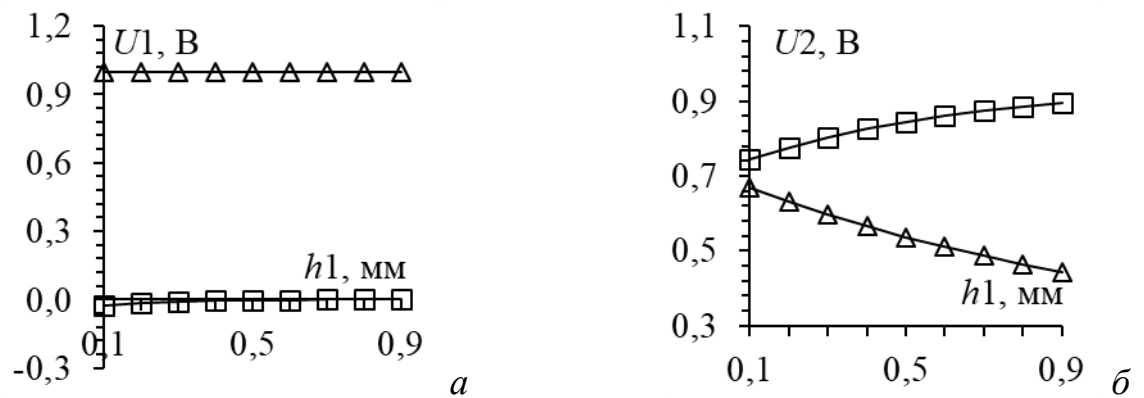


Рисунок 3.16 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $h_1$  при  $w=1,5$  мм для  $\tau_1$  (а) и  $\tau_2$  (б)

На рисунке 3.17 представлены отклики для  $w=1,5$  мм. С увеличением  $h_1$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,62 В до 2,19 В, а первого – уменьшается от 1,40 В до 0,22 В.



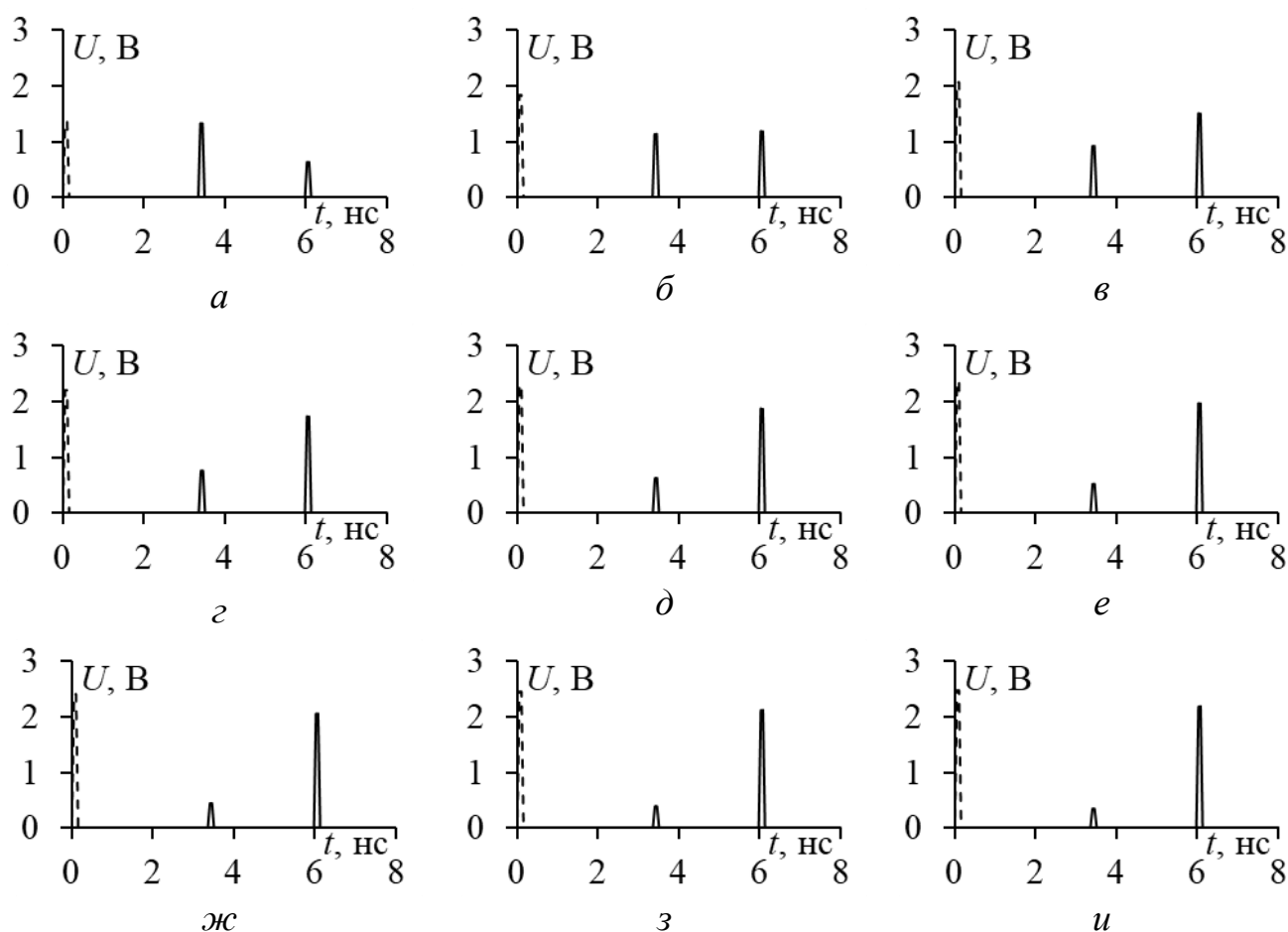


Рисунок 3.17 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $h1=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $w=1,5$  мм

В таблице 3.5 представлены отклонения  $\tau$  для  $w=1,5$  мм. Они достигают 50%.

Таблица 3.5 – Отклонения  $\tau$  при  $w=1,5$  мм

$h1$ , 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

Таким образом, проведенный анализ МПЛ с проводником сверху, при определенных значениях геометрических параметров, показал возможность использования линии в качестве модального фильтра. Например, такая возможность обнаружена при значении  $h1 \approx 0,2$  мм, которое мало зависит от  $w$ .

### 3.3 Микрополосковая линия с двумя боковыми заземленными проводниками

Здесь представлено аналогичное сравнение результатов, полученных двумя способами, для рисунка 3.18 *а*.

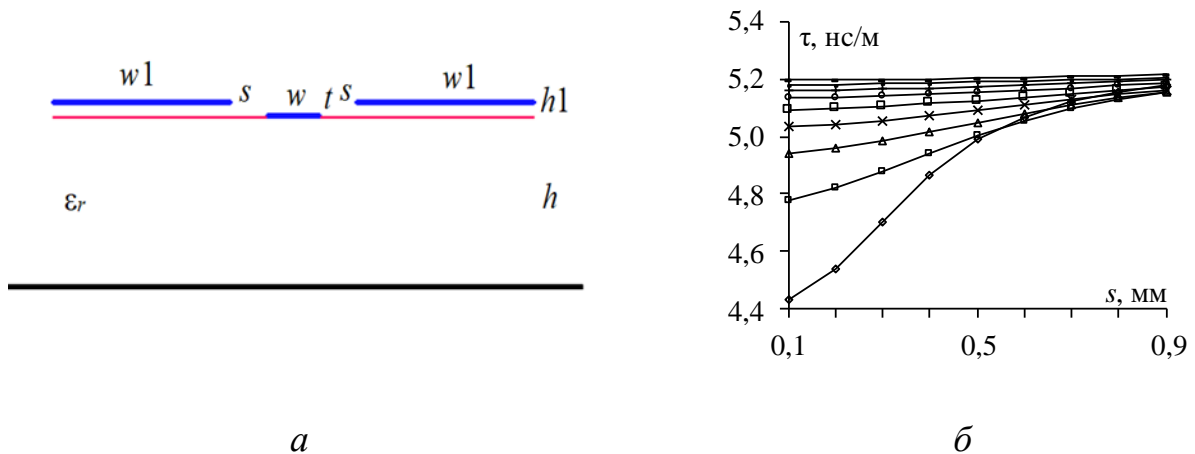


Рисунок 3.18 – Поперечное сечение МПЛ с проводниками сверху (*а*) и зависимости  $\tau$  от  $s$

при  $h1=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,4$  ( $\times$ ),  $0,5$  ( $\square$ ),  $0,6$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $+$ ),  $0,8$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $-$ ) мм (*б*)

При расположении проводников вдали от границы воздух-подложка, их влияние выражено слабо, а по мере приближения должно возрастать. В этой связи, для определения влияния проводников при приближении к границе воздух-подложка оба вычисления выполнены при  $s=0,1-0,9$  мм и при изменении  $h1$  от  $0,9$  мм до  $0,1$  мм с шагом  $0,1$  мм.

По полученным результатам для  $h1=0,9$  мм (рисунок 3.19) видно, что с уменьшением  $s$  значения  $\tau_0$  и  $\tau_1$  слабо возрастают, а  $\tau_2$  и  $\tau_3$  – убывают. Как видно, влияние проводников очень мало. Между тем вместо одной погонной задержки стало три. При этом первые две отличаются очень малыми значениями, соответствуя модам, распространяющимся почти полностью в воздухе.

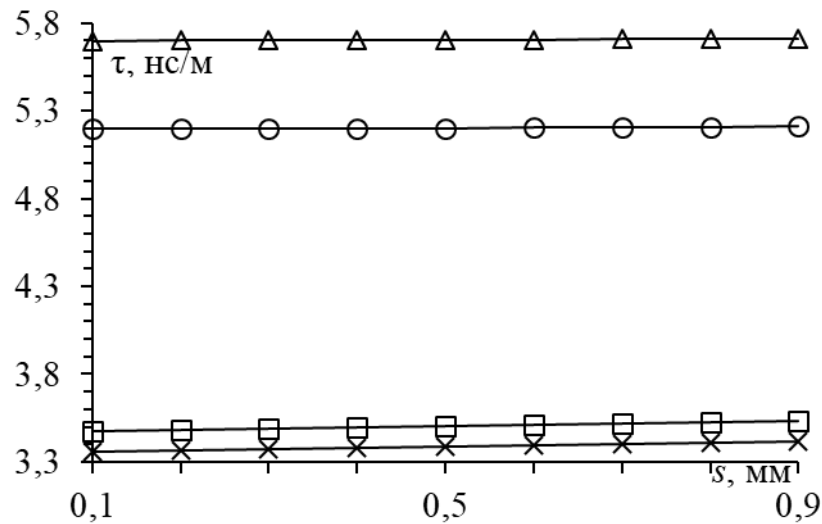


Рисунок 3.19 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,9$  мм

На рисунке 3.20 представлены собственные векторы напряжений. Как видно, для  $\tau_1$  и  $\tau_2$  они слабо меняются с уменьшением  $s$ , а для  $\tau_3$  неизменны. Достоверность результатов подтверждается их сравнением с векторами, представленными в [5] в нормированном виде через коэффициенты  $a$  и  $b$ :

$$U1 = \begin{pmatrix} a \\ 1 \\ a \end{pmatrix}, U2 = \begin{pmatrix} -b \\ 1 \\ -b \end{pmatrix}, U3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

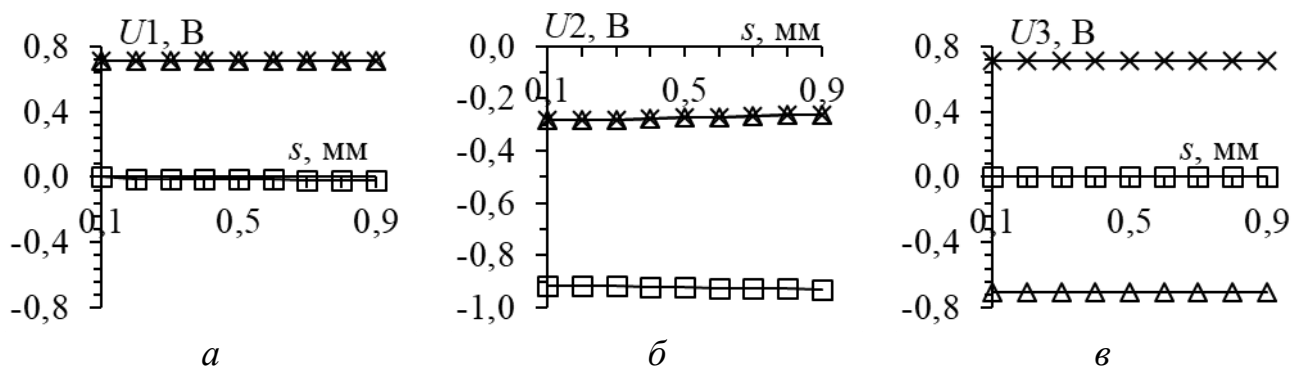


Рисунок 3.20 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,9$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

Действительно, сопоставление напряжений на проводниках, из формул (3.1) и графиков рисунка 3.20, показывает следующее. Как видно из рисунка 3.20 а, относительно напряжения на центральном проводнике (которое здесь имеет малое отрицательное значение), два других напряжения имеют

одинаковые значения, определяемые коэффициентом  $a$ , что согласуется с первым вектором  $\mathbf{v}$

(3.1). На рисунке 3.20 б, относительно того же напряжения два других напряжения имеют одинаковые отрицательные значения, определяемые коэффициентом  $b$ , что согласуется с вторым вектором  $\mathbf{v}$

(3.1). И, как видно из рисунка 3.20 в, напряжение на центральном проводнике равно нулю, а два других напряжения имеют одинаковые, но противоположные по знаку значения, что согласуется с третьим вектором  $\mathbf{v}$

(3.1). При этом напряжения этой моды не зависят от значения  $s$ .

На рисунке 3.21 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,9$  мм. Видно, что СКИ разлагается на импульсы. Поскольку проводники симметричны и имеют одинаковую ширину  $w_1=1$  мм, амплитуда импульса самой быстрой моды близка к нулю и по существу, СКИ разлагается на 2 импульса. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно увеличивается с 2,02 В до 2,03 В, а первого – уменьшается с 0,154 В до 0,153 В.

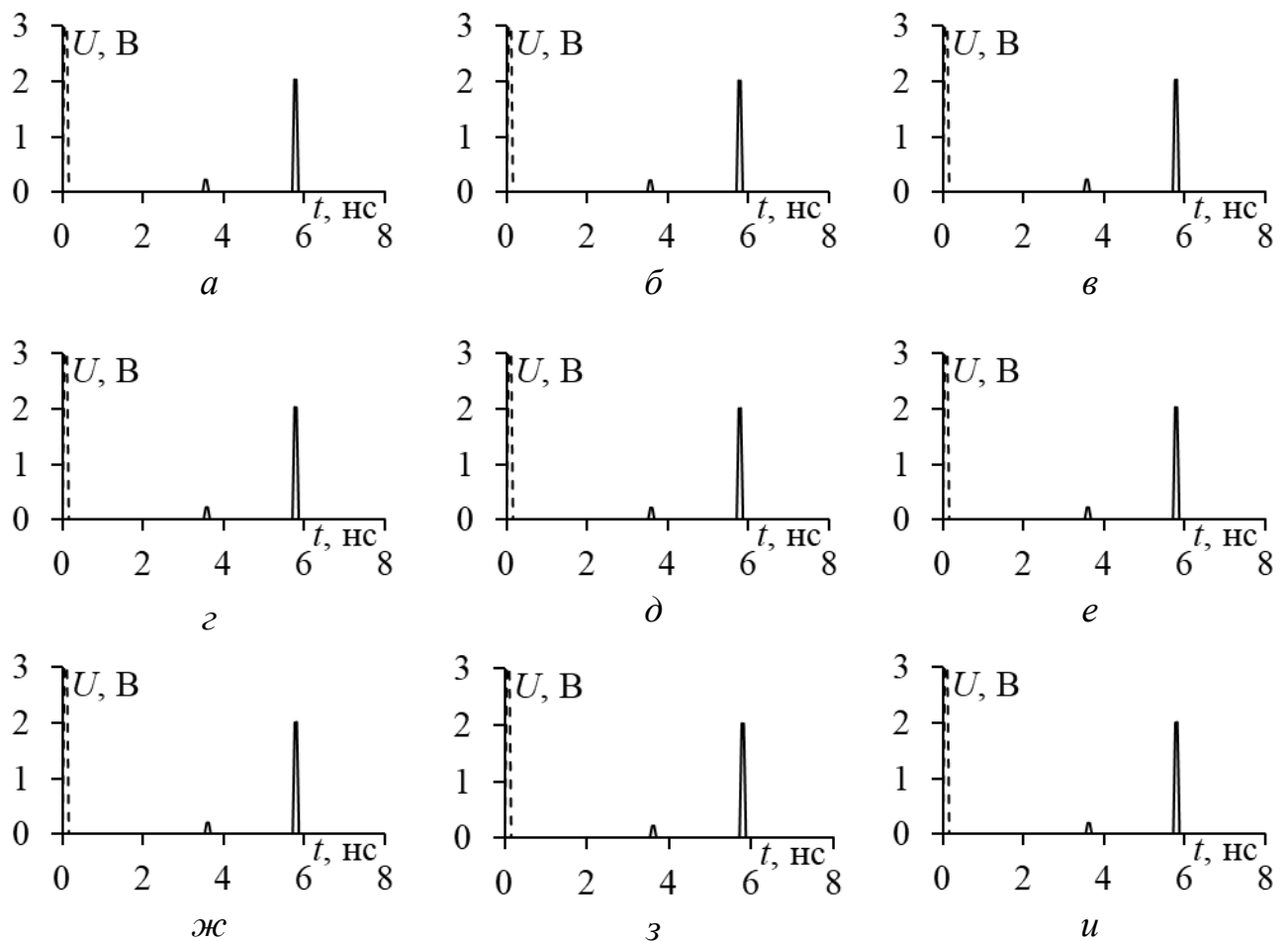


Рисунок 3.21 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,9$  мм

В таблице 3.6 представлены отклонения  $\tau$  для  $h1=0,9$  мм. Как видно, они значительны, особенно для  $\tau_2$  (до 33%) и слабо зависят от  $s$ .

Таблица 3.6 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,9$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,5	7,5	7,5	7,7	7,7	7,7	7,5	7,5	7,5
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	32,9	32,7	32,5	32,3	32,1	32,1	32,1	31,7	31,7

На рисунках 3.22 и 3.23 представлены аналогичные зависимости для  $h1=0,8$  мм. Изменения незначительны.

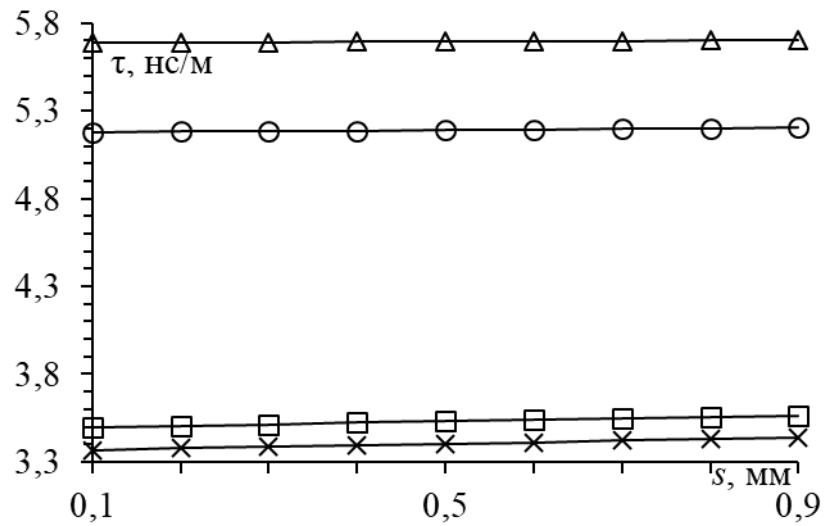


Рисунок 3.22 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,8$  мм

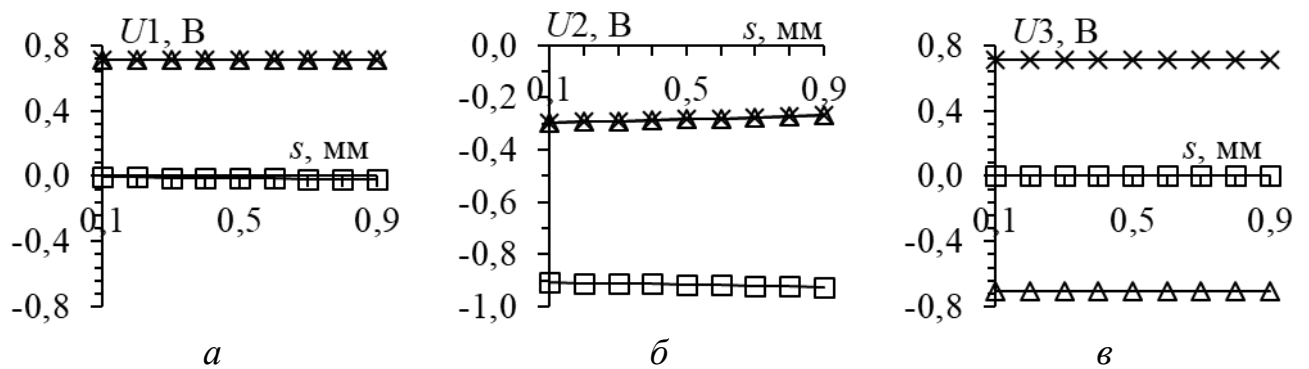


Рисунок 3.23 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,8$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.24 представлены отклики для  $h_1=0,8$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно увеличивается с 1,97 В до 2,01 В, а первого – уменьшается от 0,19 В до 0,15 В.

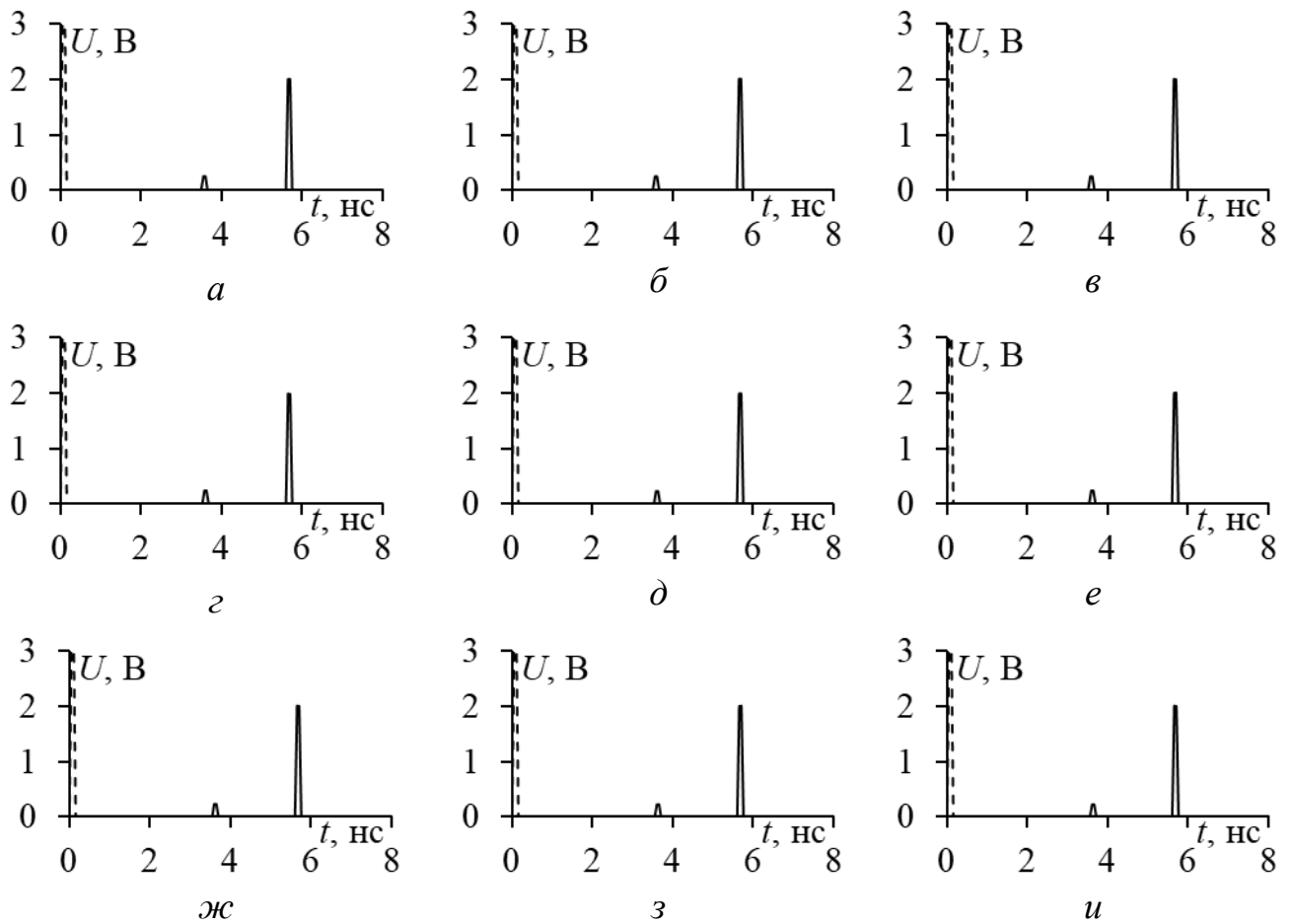


Рисунок 3.24 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (*a*),  $0,2$  (*б*),  $0,3$  (*в*),  $0,4$  (*г*),  $0,5$  (*д*),  $0,6$  (*е*),  $0,7$  (*ж*),  $0,8$  (*з*) и  $0,9$  (*и*) для  $h_1=0,8$  мм

В таблице 3.7 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,8$  мм. Изменения незначительны.

Таблица 3.7 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,8$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,7	7,7	7,7
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	32,6	32,4	32,2	32,2	32	32	32	32	32

На рисунках 3.25 и 3.26 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,7$  мм. Изменения незначительны.

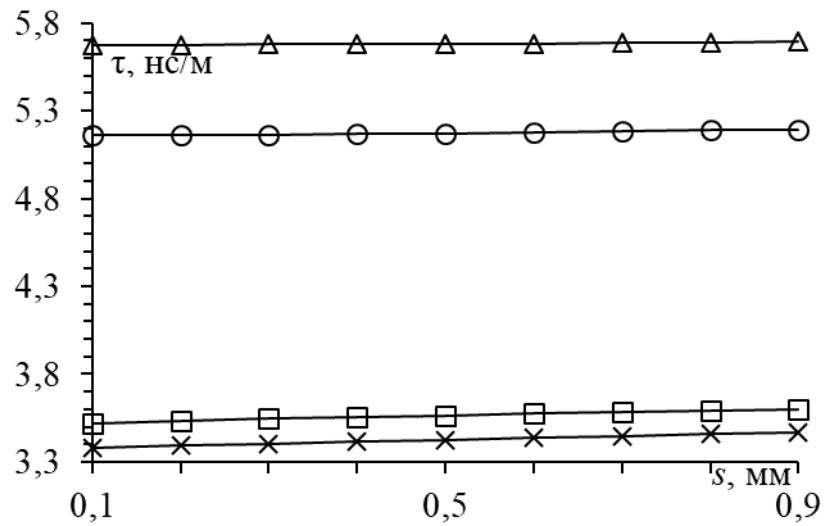


Рисунок 3.25 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,7$  мм

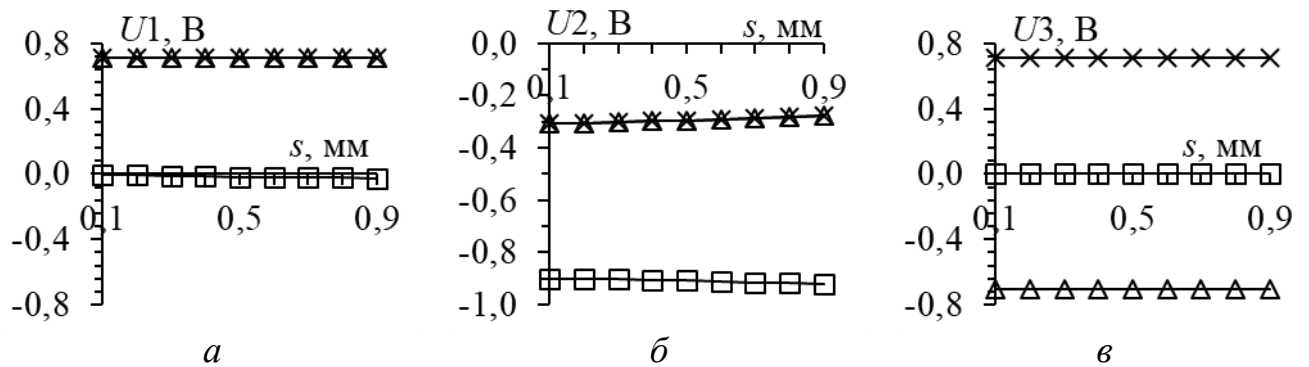


Рисунок 3.26 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,7$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.27 представлены отклики для  $h_1=0,7$  мм. Видна тенденция слабого увеличения амплитуды первого импульса и уменьшения амплитуды второго импульса с приближением проводников к полоске и друг к другу.



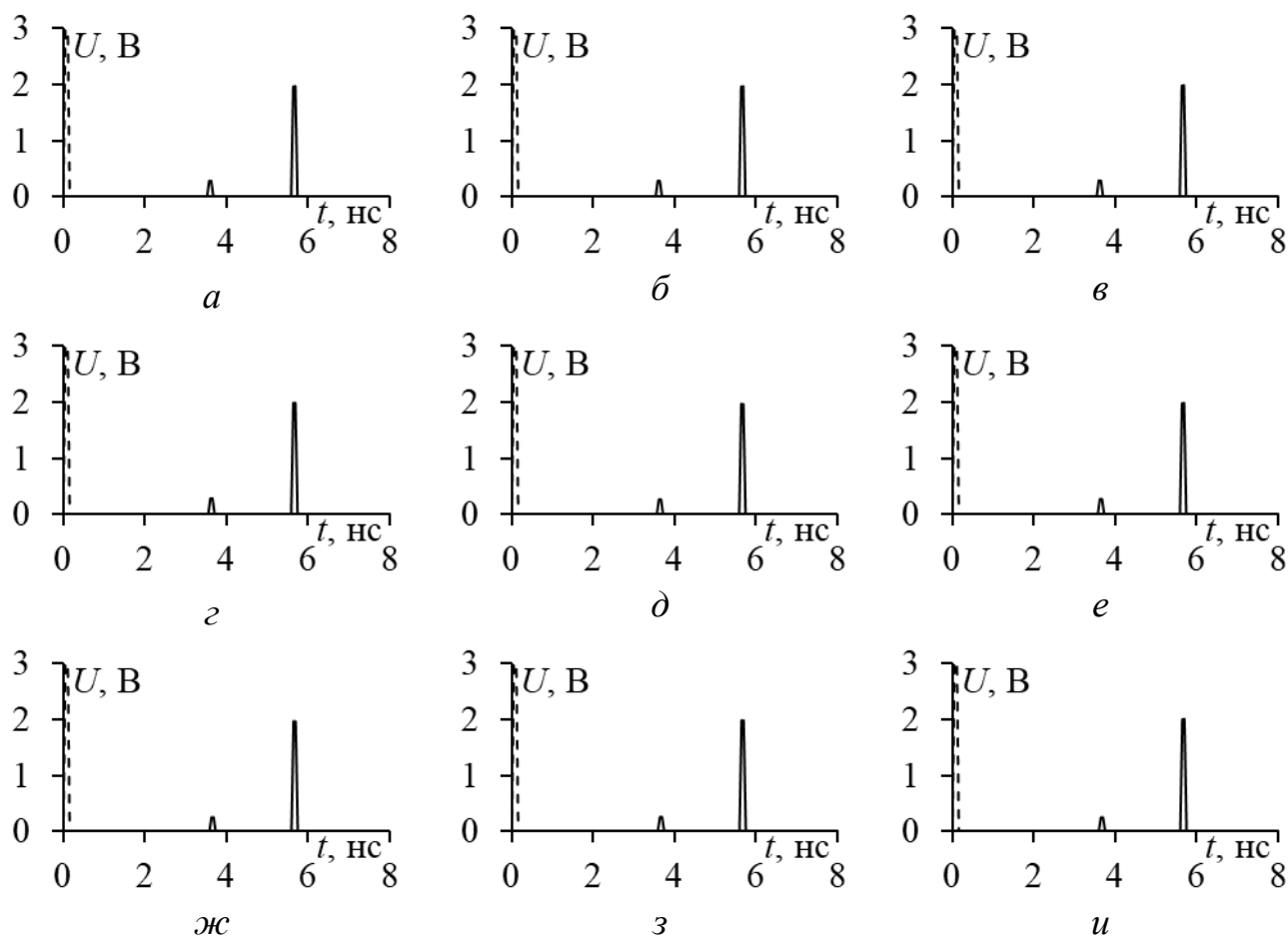


Рисунок 3.27 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,7$  мм

В таблице 3.8 представлены отклонения  $\tau$  для  $h1=0,7$  мм. Они меньше.

Таблица 3.8 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,7$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	7,2	7,2	7,4	7,2	7,2	7,1	7,1	7,1	7,3
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	30,2	29,8	29,7	29,6	29,2	29,2	29	28,9	28,7

На рисунках 3.28 и 3.29 представлены аналогичные результаты для  $h1=0,6$  мм. Изменения незначительны.

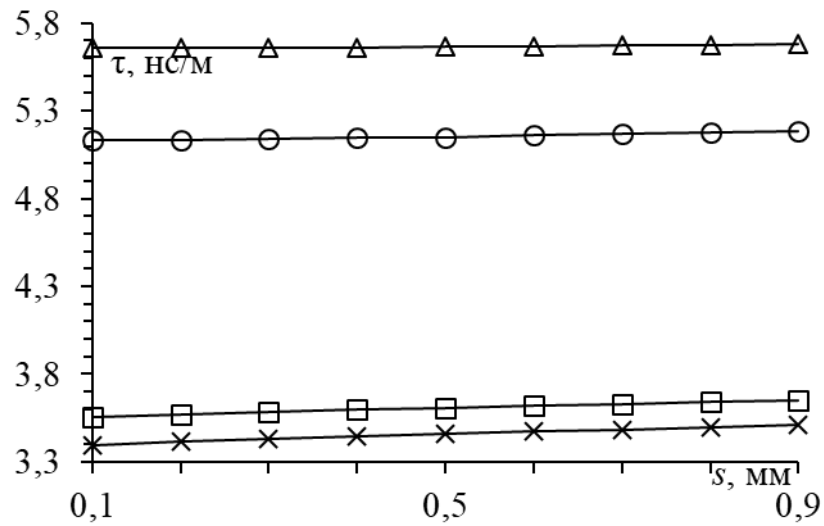


Рисунок 3.28 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,6$  мм

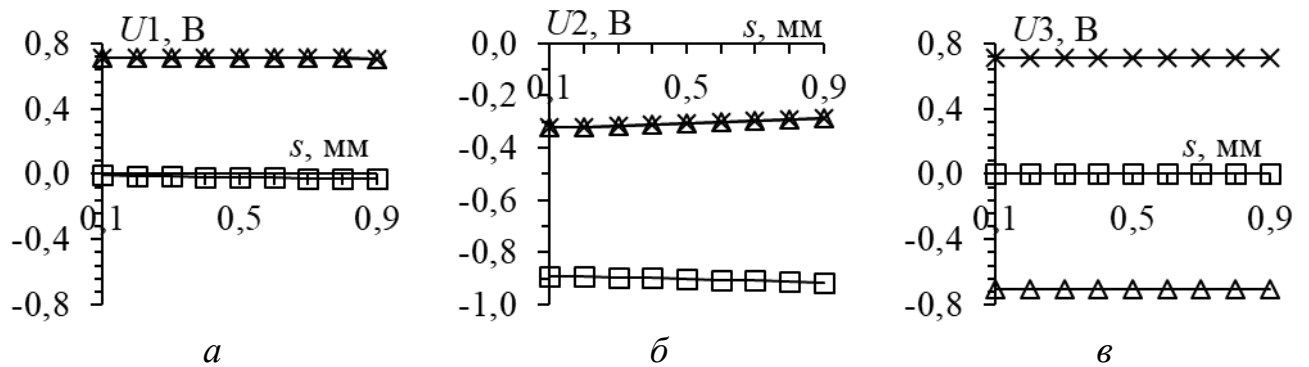


Рисунок 3.29 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,6$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.30 представлены отклики для  $h_1=0,6$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно увеличивается с 1,89 В до 1,94 В, а первого – уменьшается с 0,3 В до 0,18 В.

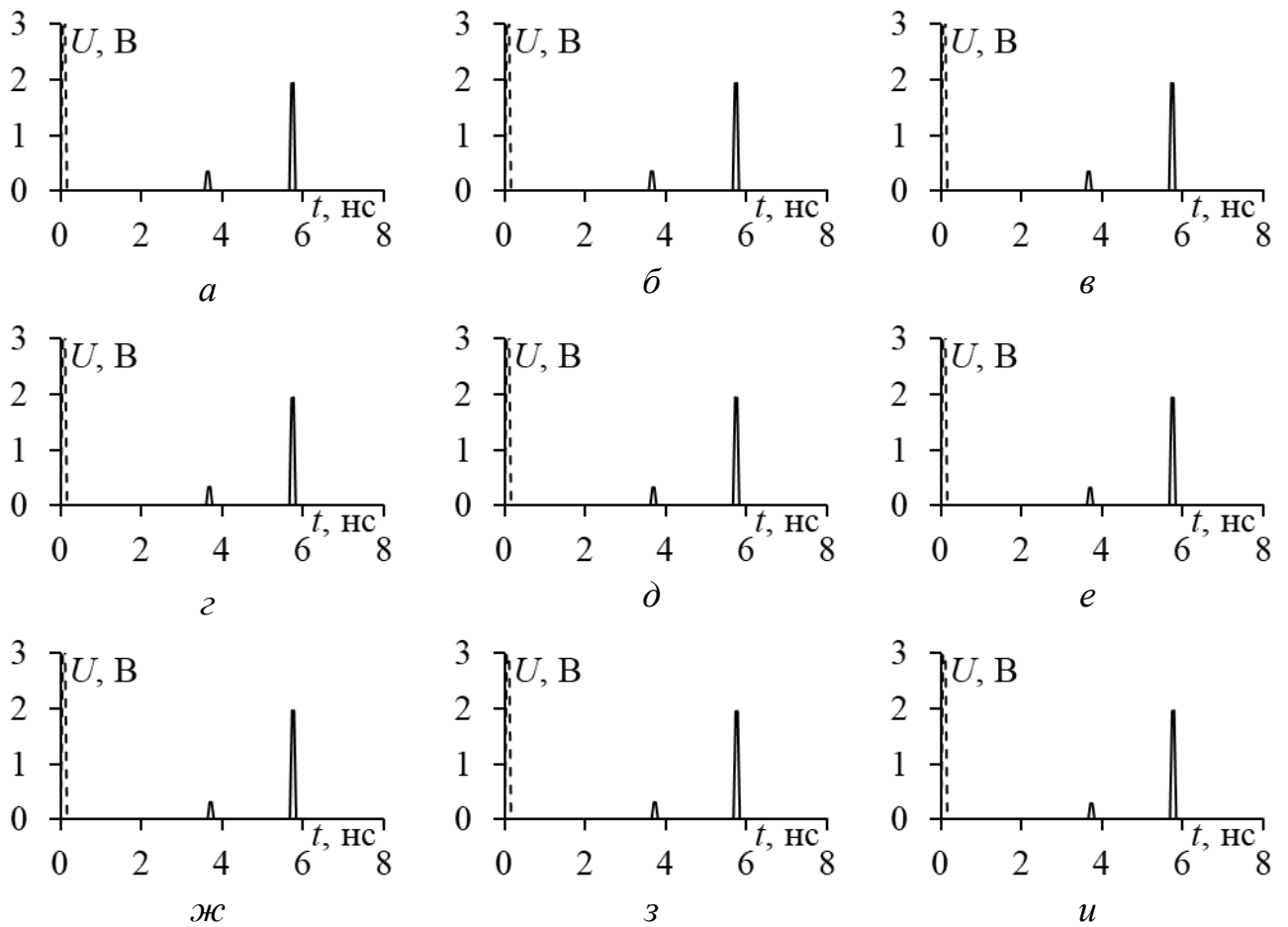


Рисунок 3.30 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,6$  мм

В таблице 3.9 представлены отклонения  $\tau$  при  $h1=0,6$  мм. Изменения незначительны.

Таблица 3.9 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,6$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,8	7,8	7,8	7,8	7,6	7,6	7,4	7,4	7,5
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	29,8	29,4	29,4	29,2	28,9	28,9	28,8	28,8	28,6

На рисунках 3.31 и 3.32 представлены аналогичные результаты для  $h1=0,5$  мм. Изменения незначительны.

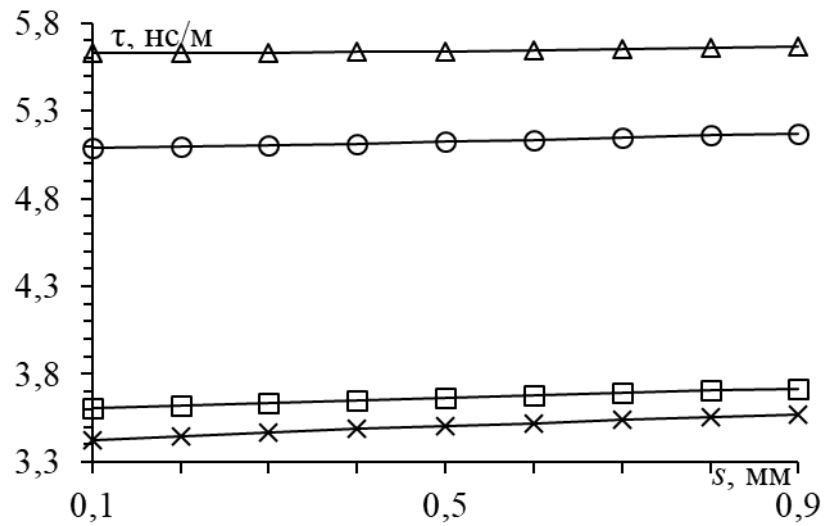


Рисунок 3.31 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,5$  мм

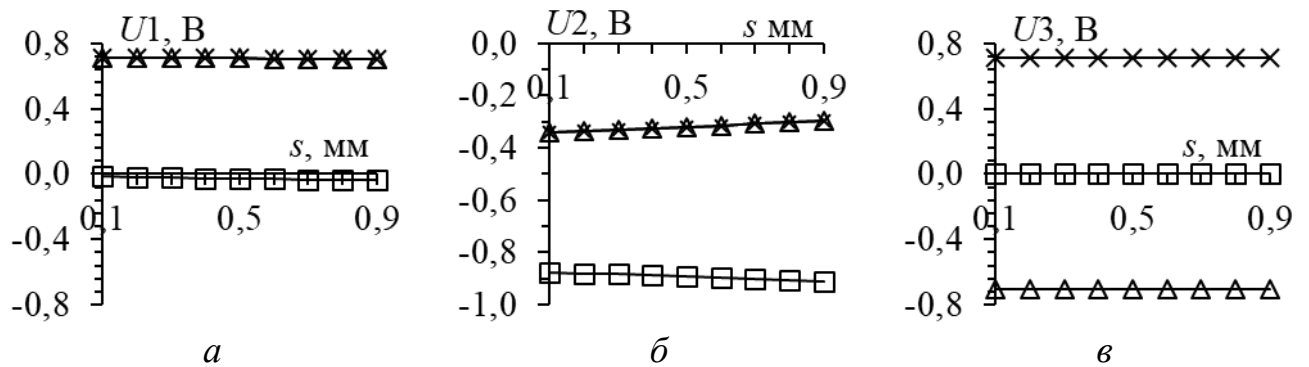


Рисунок 3.32 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,5$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.33 представлены временные отклики для  $h_1=0,5$  мм. Тенденции прежние.

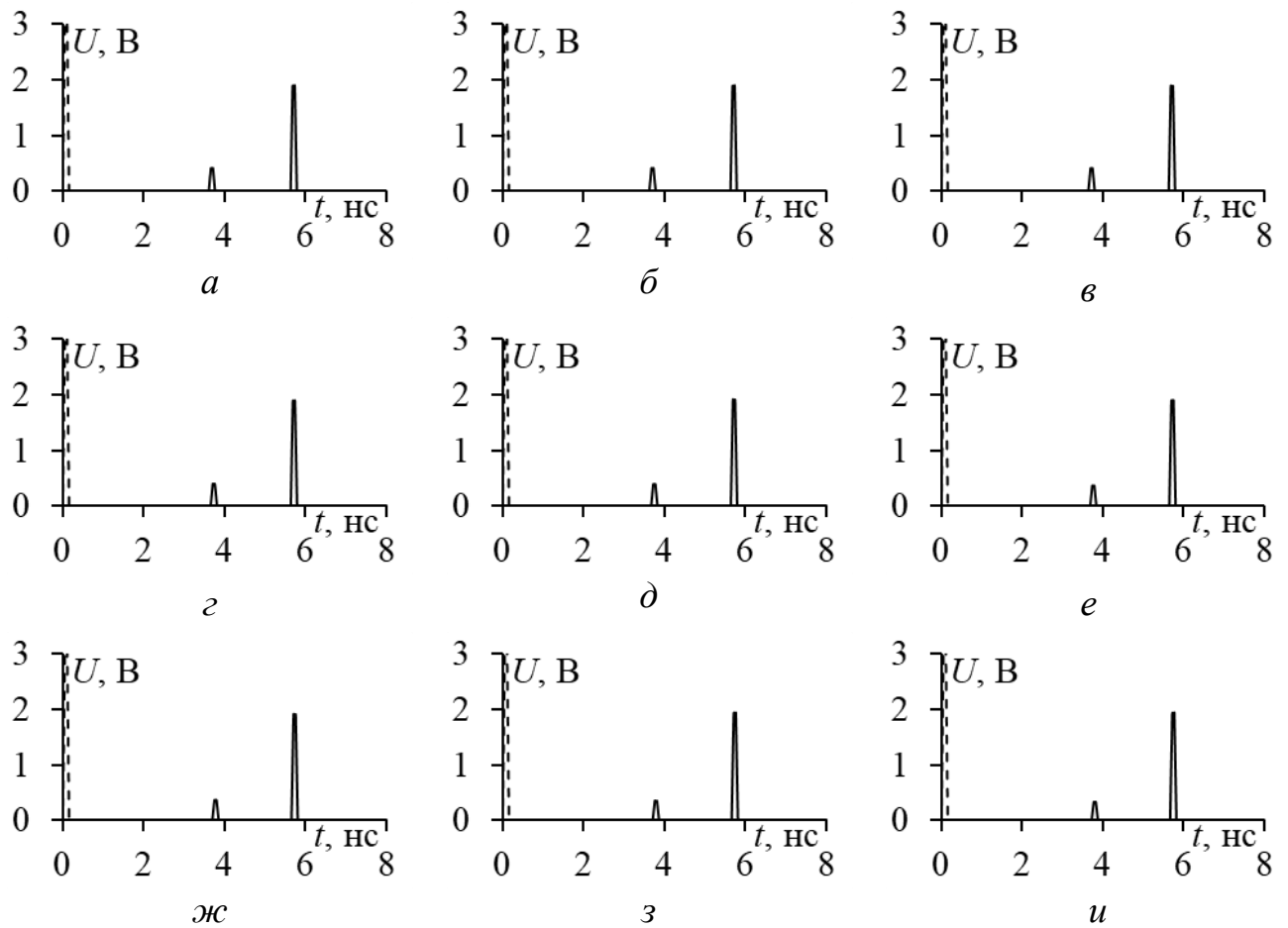


Рисунок 3.33 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h_1=0,5$  мм

В таблице 3.10 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,5$  мм. Изменения незначительны.

Таблица 3.10 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,5$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,8	7,8	7,8	7,8	7,6	7,6	7,4	7,3	7,5
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	29,8	29,4	29,4	29,2	28,9	28,9	28,8	28,8	28,6

На рисунках 3.34 и 3.35 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,4$  мм. Изменения незначительны.

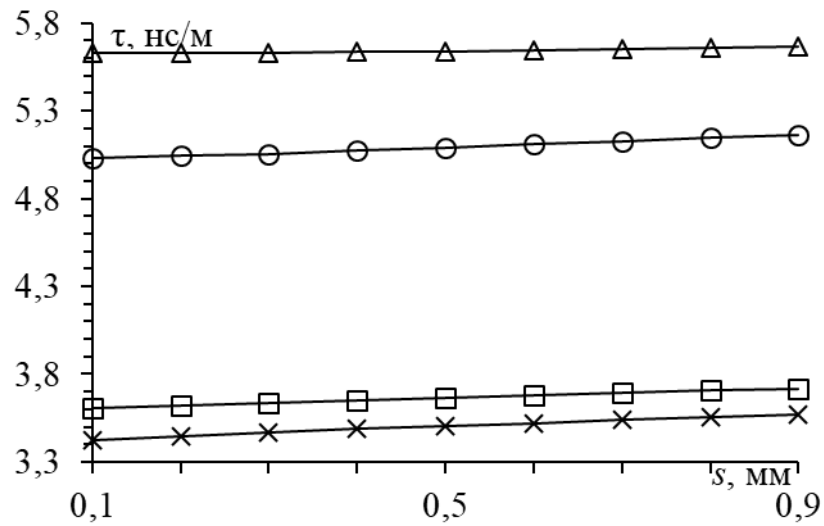


Рисунок 3.34 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,4$  мм

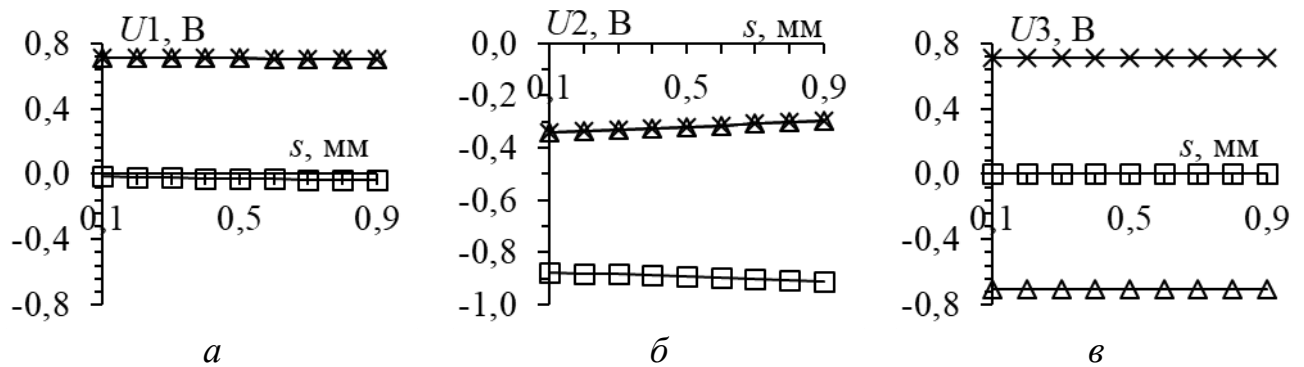


Рисунок 3.35 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,4$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.36 представлены отклики для  $h_1=0,4$  мм. Тенденции прежние.

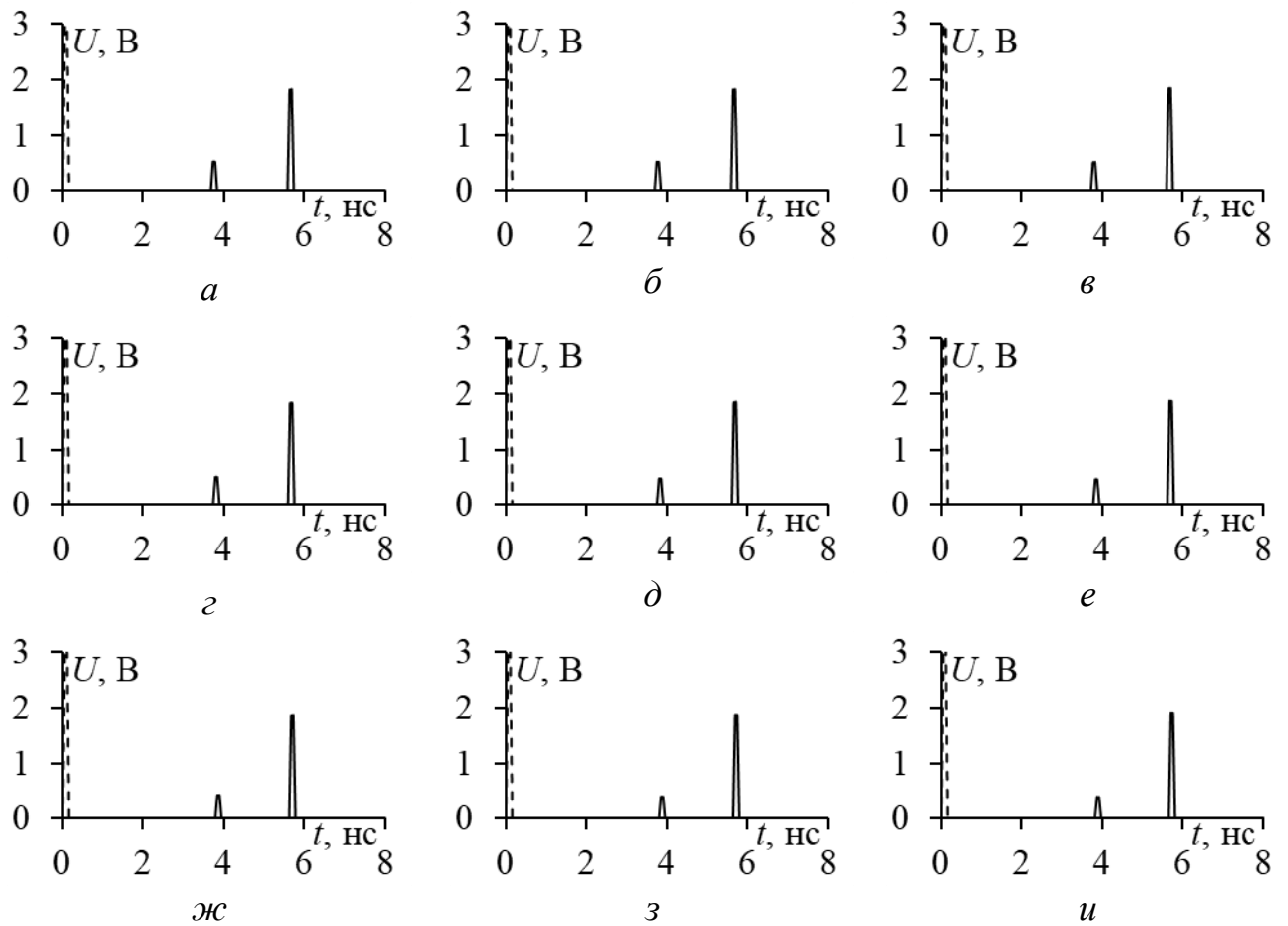


Рисунок 3.36 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,4$  мм

В таблице 3.11 представлены отклонения  $\tau$  при  $h1=0,4$  мм. Изменения малы, но различны.

Таблица 3.11 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,4$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	9,15	8,93	8,70	8,48	8,25	8,02	7,80	7,78	7,56
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	27,04	26,98	26,88	26,63	26,72	26,61	26,51	26,46	26,55

На рисунках 3.37 и 3.38 представлены аналогичные результаты для  $h1=0,3$  мм.

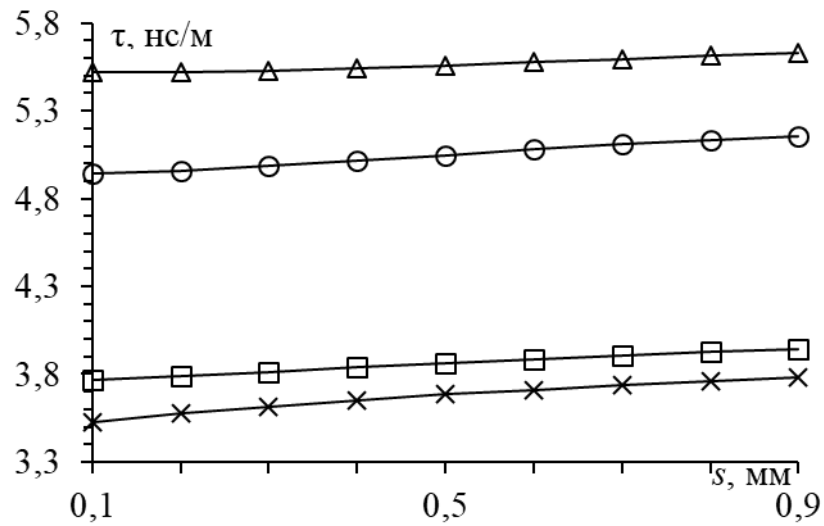


Рисунок 3.37 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,3$  мм

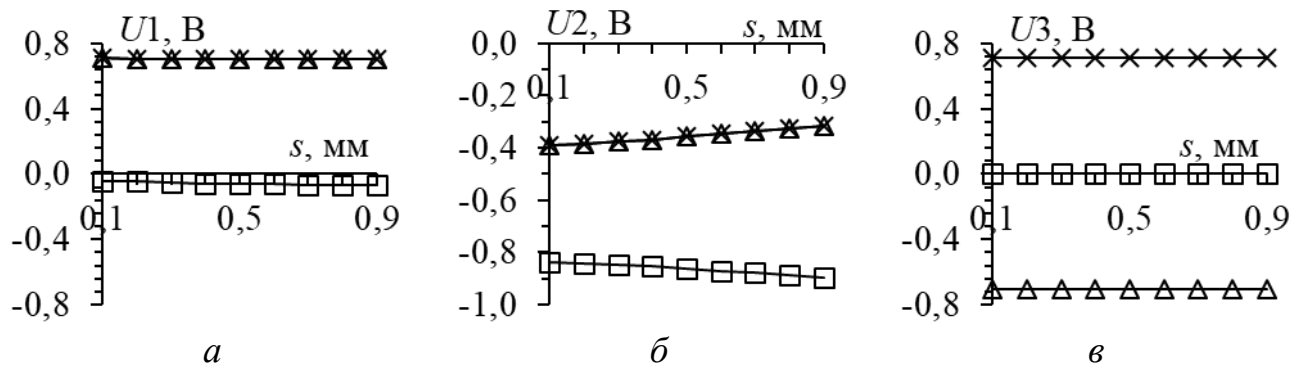


Рисунок 3.38 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,3$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.39 представлены отклики для  $h_1=0,3$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 1,44 В до 1,69 В, а первого – уменьшается от 0,968 В до 0,452 В.



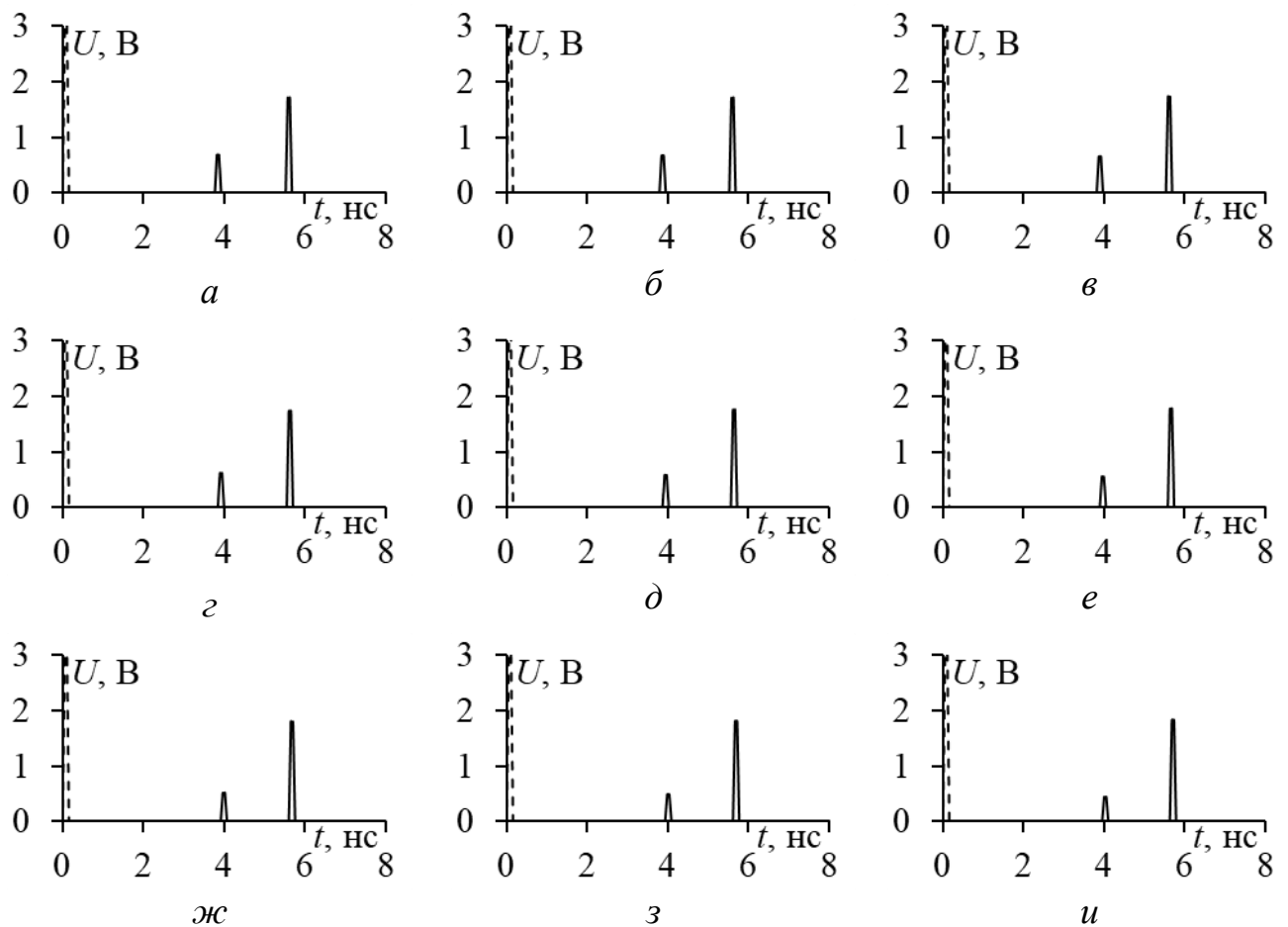


Рисунок 3.39 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з),  $0,9$  (и)  
 для  $h1=0,3$  мм

В таблице 3.12 представлены отклонения  $\tau$  для  $h1=0,3$  мм. Изменения аналогичные.

Таблица 3.12 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,3$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	9,72	9,5	9,2	8,6	8,3	8,1	7,6	7,6	7,4
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	23,9	23,8	23,7	23,7	23,8	23,8	23,9	23,8	23,9

На рисунках 3.40 и 3.41 представлены аналогичные результаты для  $h1=0,2$  мм. Результаты близки к предыдущим, но изменения стали более выраженными.

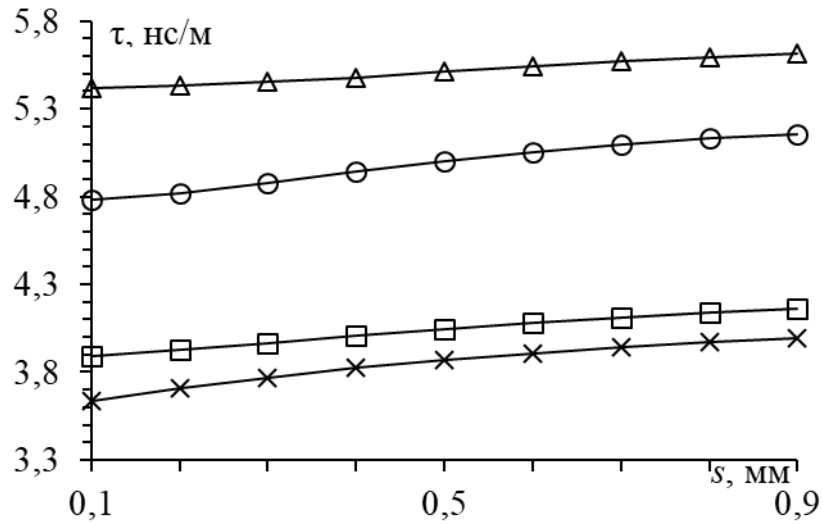


Рисунок 3.40 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$ (□),  $\tau_2$ (Δ) и  $\tau_3$ (×) от  $s$  при  $h_1=0,2$  мм

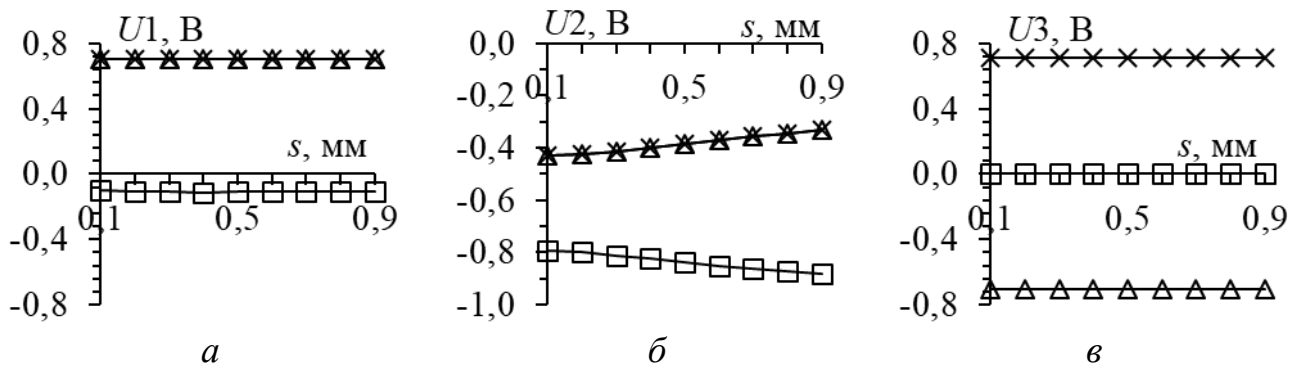


Рисунок 3.41 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,2$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.42 представлены отклики для  $h_1=0,2$  мм. Как видно, амплитуды импульсов уже сопоставимы. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 1,44 В до 1,69 В, а первого – уменьшается от 0,97 В до 0,45 В.

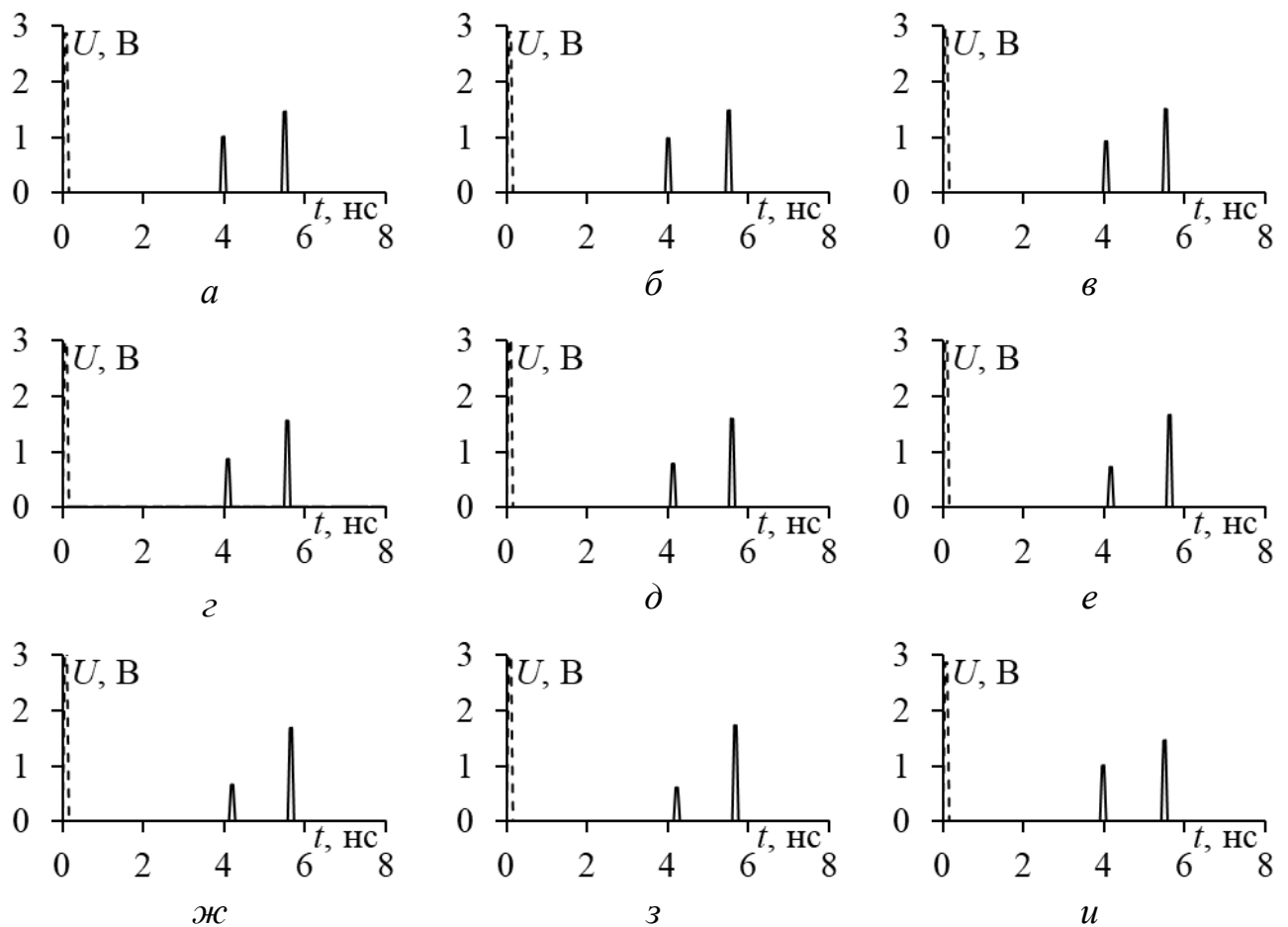


Рисунок 3.42 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и)  
для  $h1=0,2$  мм

В таблице 3.13 представлены отклонения  $\tau$  при  $h1=0,2$  мм. Тенденции роста отклонения  $\tau_1$  и уменьшения отклонения  $\tau_2$  становятся более выраженными.

Таблица 3.13 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,2$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	11,30	10,79	9,84	9,11	8,4	7,71	7,45	7,21	6,98
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	18,62	18,67	18,9	19,23	19,4	19,76	19,8	19,88	19,7

На рисунках 3.43 и 3.44 представлены аналогичные результаты для  $h1=0,1$  мм. Видно, что значения  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  плавно возрастают с увеличением  $s$ , а зависимость  $\tau_0$  при малых значениях  $s=0,1-0,4$  мм возрастает более резко.

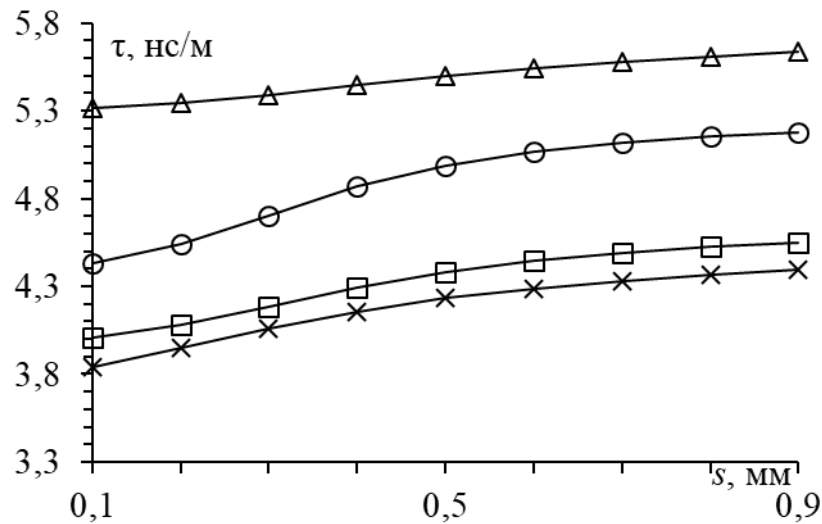


Рисунок 3.43 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$ (□),  $\tau_2$ (△) и  $\tau_3$ (×) от  $s$  при  $h_1=0,1$  мм

Поведение зависимостей для элементов собственных векторов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  изменяются сильнее, так как проводники находятся вблизи границы воздух-подложка.

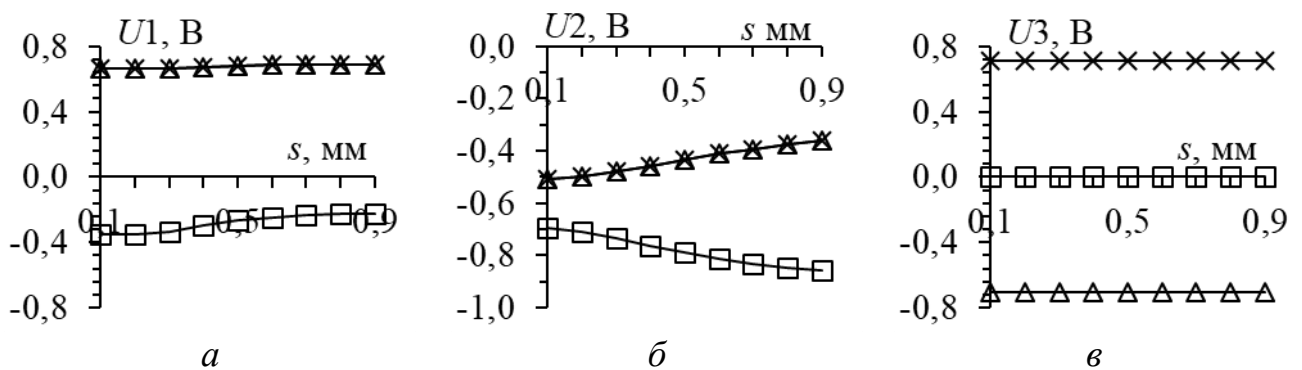


Рисунок 3.44 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,1$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.45 представлены отклики для  $h_1=0,1$  мм. Амплитуды импульсов с увеличением  $s$  меняются друг относительно друга. Так, при  $s=0,1$  мм амплитуда первого импульса составляет 1,74 В, а второго – 0,73 В, а при  $s=0,9$  мм амплитуда первого импульса составляет 0,52 В, а второго – 1,62 В. Таким образом, возможно их равенство.

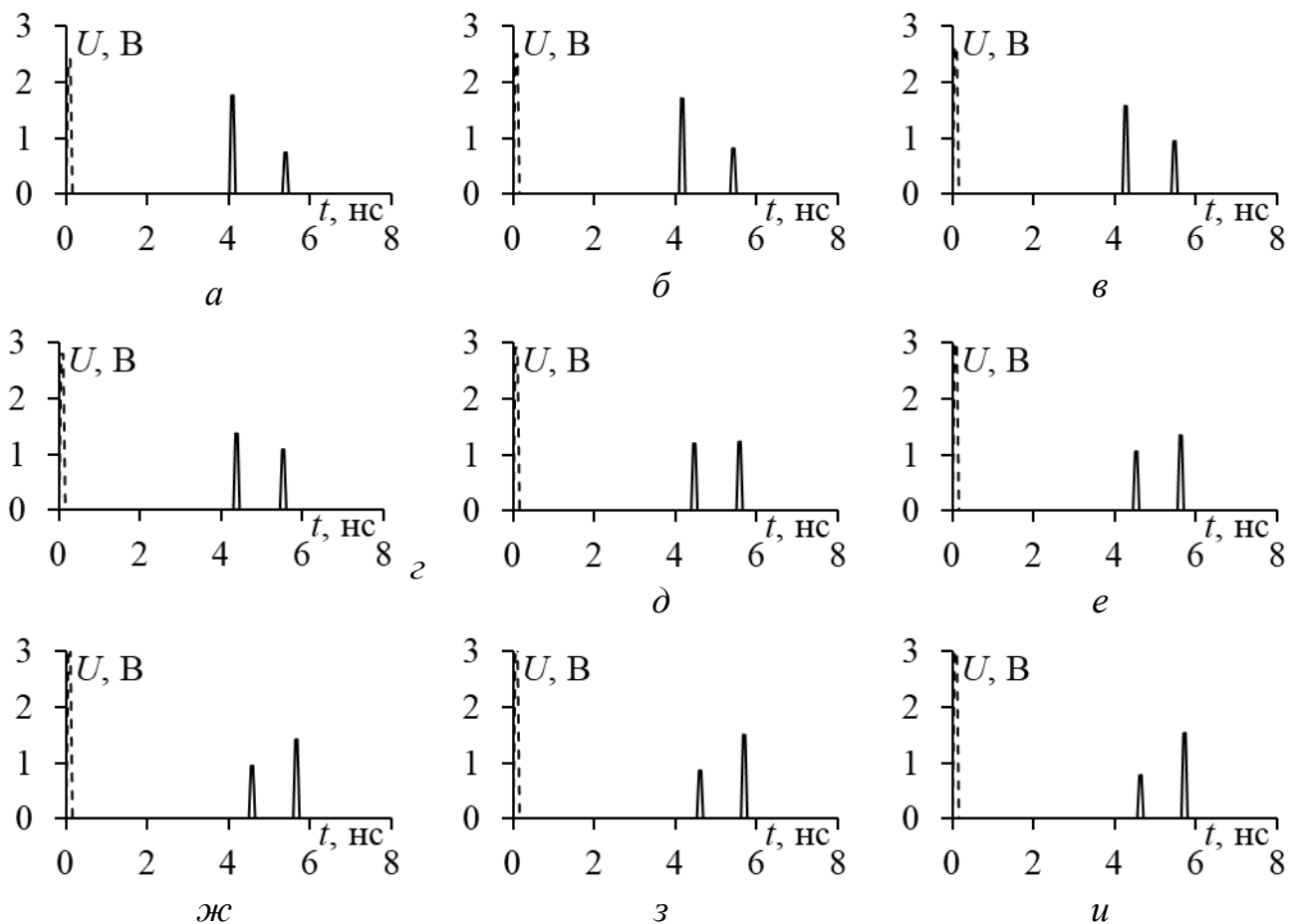


Рисунок 3.45 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,1$  мм

В таблице 3.14 представлены отклонения  $\tau$  при  $h1=0,1$  мм. Они стали сильно выраженными. Так, с увеличением  $s$  отклонение для  $\tau_1$  уменьшается с 18,1% до 7% для  $\tau_2$  увеличивается от 0,1 до 0,7 мм с 9,5% до 12,9 %, но с увеличением до 0,9 мм уменьшается до 12,7%.

Таблица 3.14 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,1$  мм

$s$ , 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

Таким образом, проведенный анализ МПЛ с проводниками сверху, при определенных значениях геометрических параметров, показал возможность использования линии в качестве модального фильтра. Например, такая возможность обнаружена при  $h1=0,1$  мм и  $s=0,5$  мм.

Дополнительно выполнено моделирование для  $h1=0,1$  мм при изменении ширины второго проводника  $w2$  (рисунок 3.46).

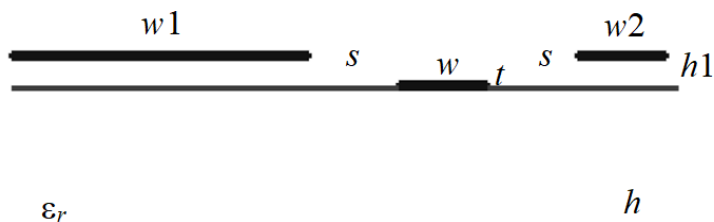


Рисунок 3.46 – Поперечное сечение МПЛ с асимметричными проводниками сверху

На рисунке 3.47 представлены зависимости  $\tau$  от  $s$  при  $h1=0,1$  мм для прежнего (1 мм) и нового (0,3 мм) значений  $w2$ . Как видно, значительно увеличилась разница  $\tau_2$  и  $\tau_3$ . Так, при  $s=0,1$  мм отклонение составляет  $\pm 4,9\%$ . Кроме того, увеличилась разность  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

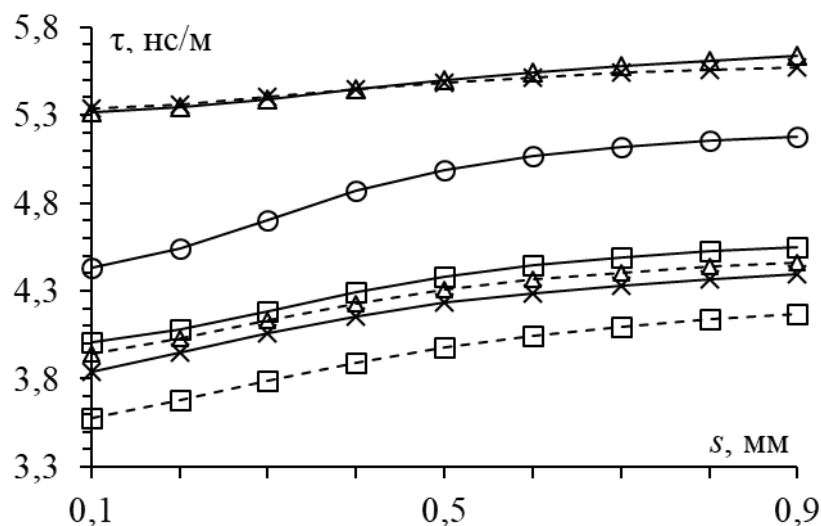


Рисунок 3.47 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h1=0,1$  мм для  $w2=1$  мм (—) и 0,3 мм (---)

На рисунке 3.48 представлены соответствующие зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$ . Как видно, их поведение отличается от прежних, т.к. проводники не симметричны.

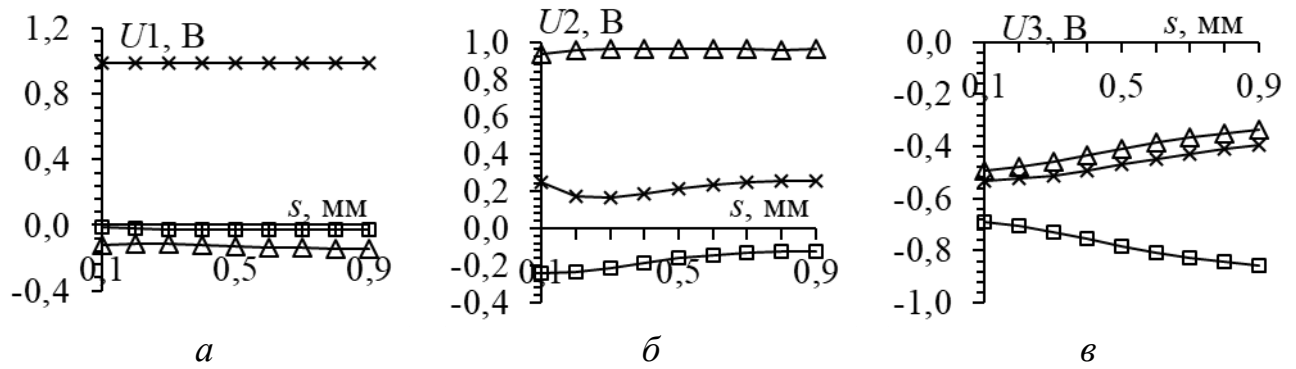


Рисунок 3.48 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,1$  мм и  $w_2=0,3$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.49 представлены результаты моделирования откликов на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,1$  мм и  $w_2=0,3$  мм. Видно, что появился первый импульс самой быстрой моды, так что СКИ разлагается на 3 импульса. Это подтверждает, что этот импульс был скрыт (имел нулевую амплитуду) из-за симметрии проводников.

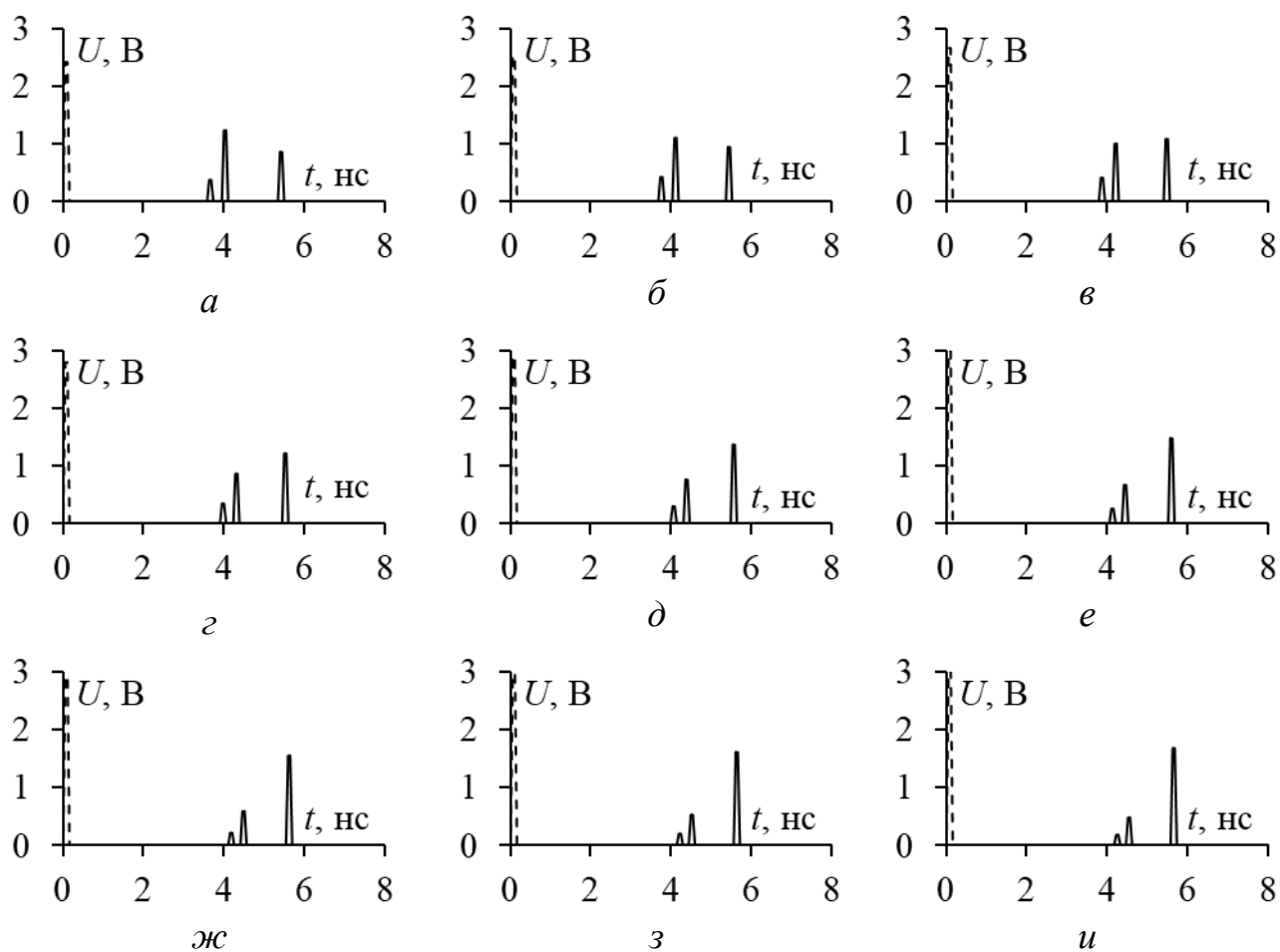


Рисунок 3.49 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з),  $0,9$  (и)  
 для  $h_1=0,1$  мм при  $w_2=0,3$  мм

Выполнено аналогичное сравнение для поперечного сечения из рисунка 3.50.



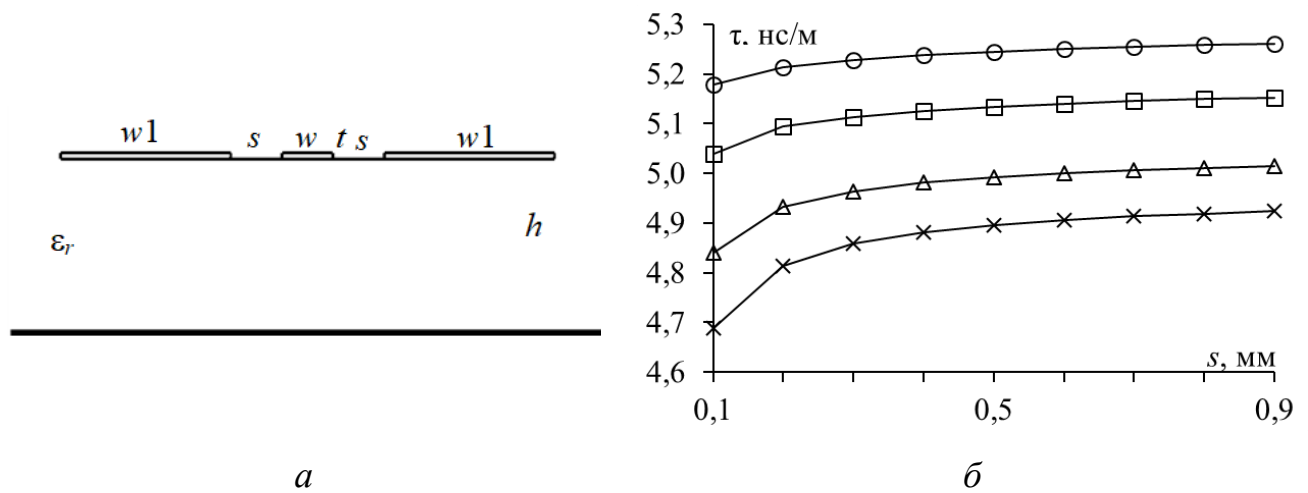


Рисунок 3.50 – Поперечное сечение МПЛ с проводниками на границе воздух-подложка (а) и зависимости  $\tau$  от  $s$  при  $t=18$  (○), 35 (□), 70 (△) и 105 (×) мкм (б)

При расположении проводников на границе воздух-подложка значение  $\tau$  возрастает. Для определения влияния проводников оба вычисления выполнены при  $s=0,1-0,9$  мм и  $t=18, 35, 70$  и 105 мкм.

По результатам для  $t=18$  мкм (рисунок 3.51) видно, что с увеличением  $s$  значения  $\tau$  возрастают. При этом, в отличие от проводников сверху, погонные задержки всех мод больше  $\tau_0$ .

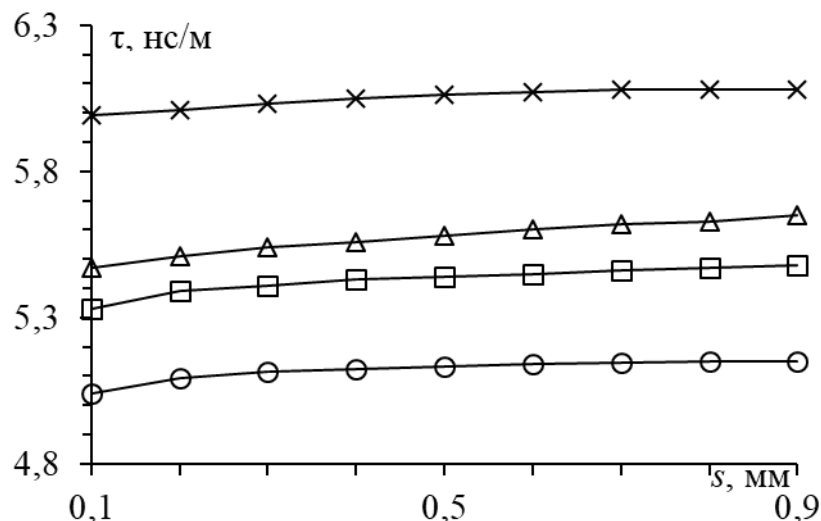


Рисунок 3.51 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (△) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $t=18$  мкм

На рисунке 3.52 представлены собственные векторы напряжений. Как видно, для  $\tau_1$  и  $\tau_3$  они слабо меняются с ростом  $s$ , а для  $\tau_2$  неизменны.

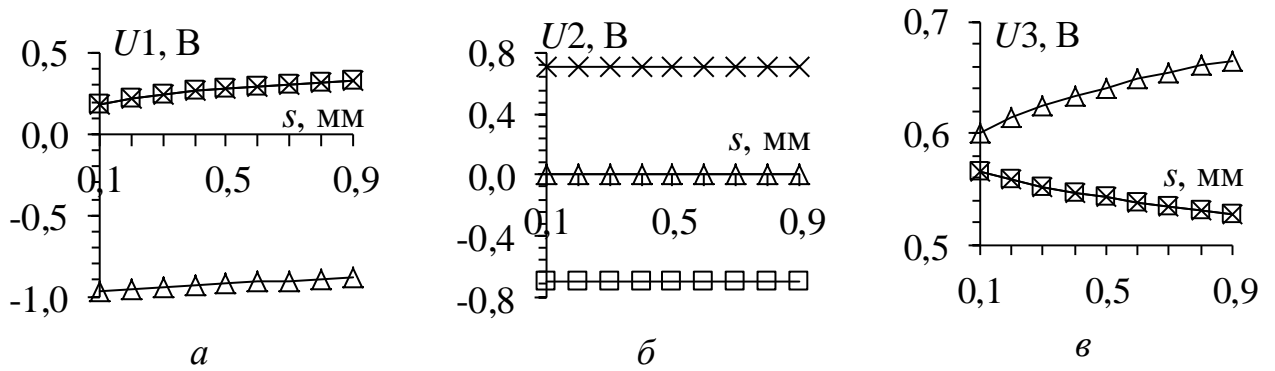


Рисунок 3.52 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=18$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.53 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=18$  мкм. Видно, что СКИ разлагается на 2 импульса. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,04 В до 0,39 В, а первого – уменьшается с 2,41 В до 1,63 В.

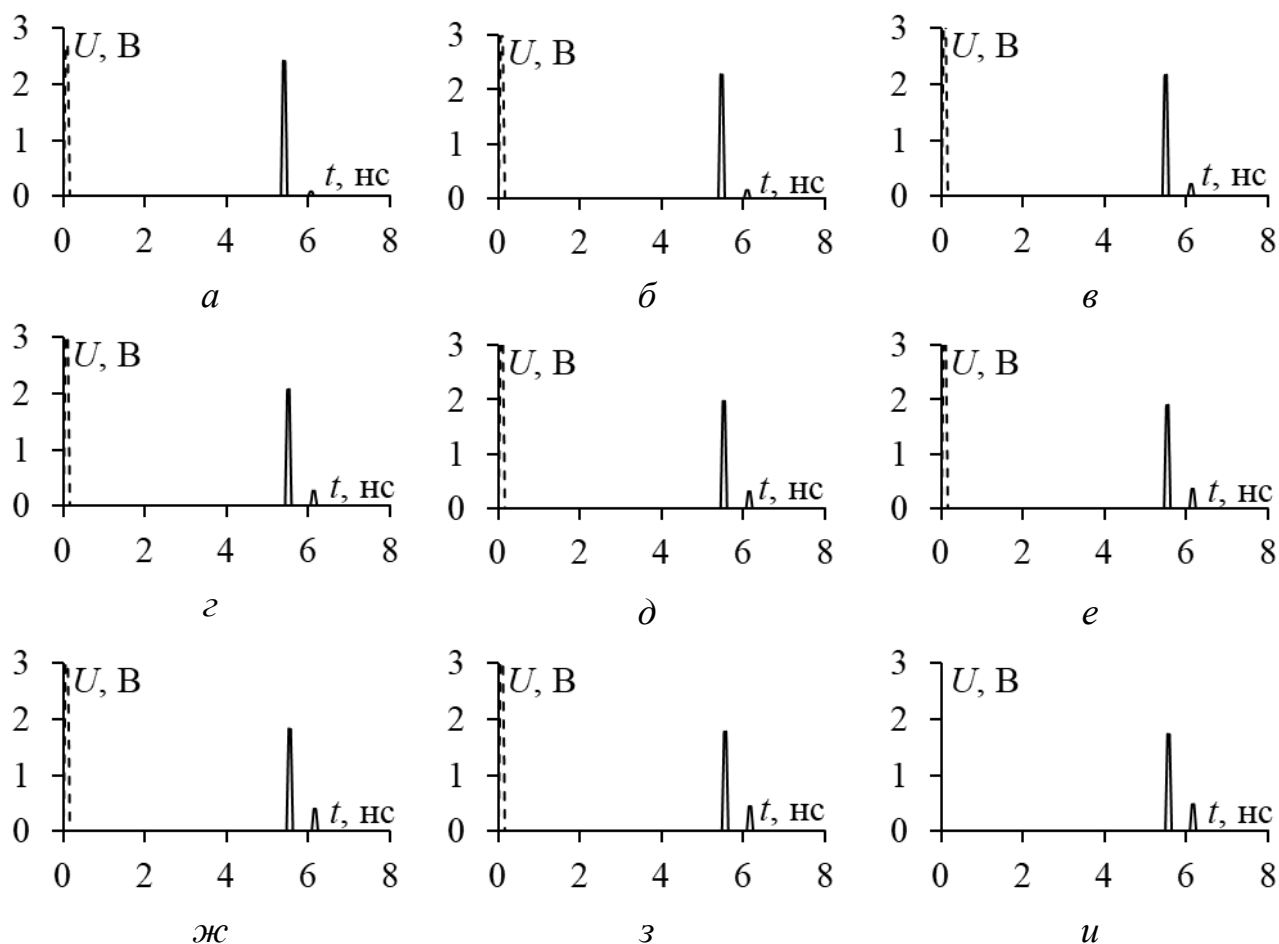


Рисунок 3.53 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и)  
для  $t=18$  мкм

В таблице 3.15 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=18$  мкм. Как видно, в силу симметрии проводников, СКИ разлагается на 2 импульса (первый и третий), т.к. амплитуда второго импульса равна нулю. Поэтому отклонения рассчитаны для первого ( $\tau_1$ ) и третьего импульсов ( $\tau_3$ ). Отклонения  $\tau_1$  с увеличением  $s$  незначительно возрастают, а  $\tau_3$  – составляют около 15,5%.

Таблица 3.15 – Отклонения  $\tau$  при  $t=18$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) \cdot 100\%$	2,9	3,3	3,5	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) \cdot 100\%$	15,6	15,4	15,4	15,5	15,6	15,7	15,7	15,7	15,6

На рисунках 3.54 и 3.55 представлены аналогичные зависимости для  $t=35$  мкм. Изменения незначительны.

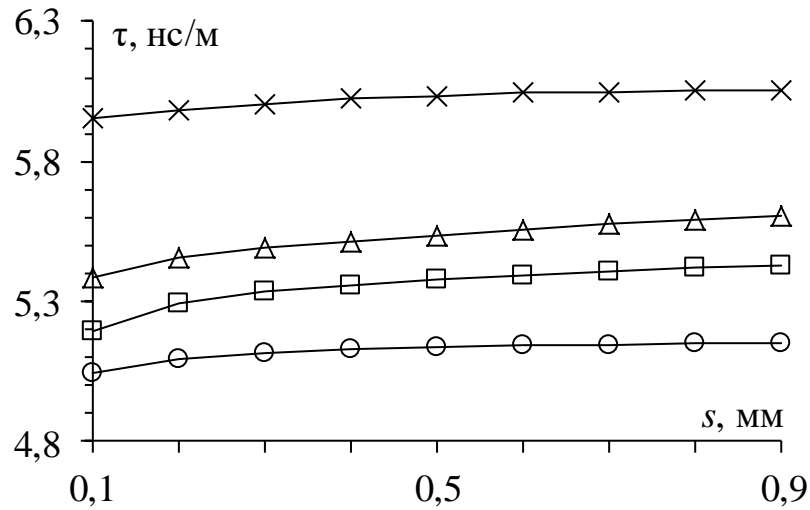


Рисунок 3.54 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $t=35$  мкм

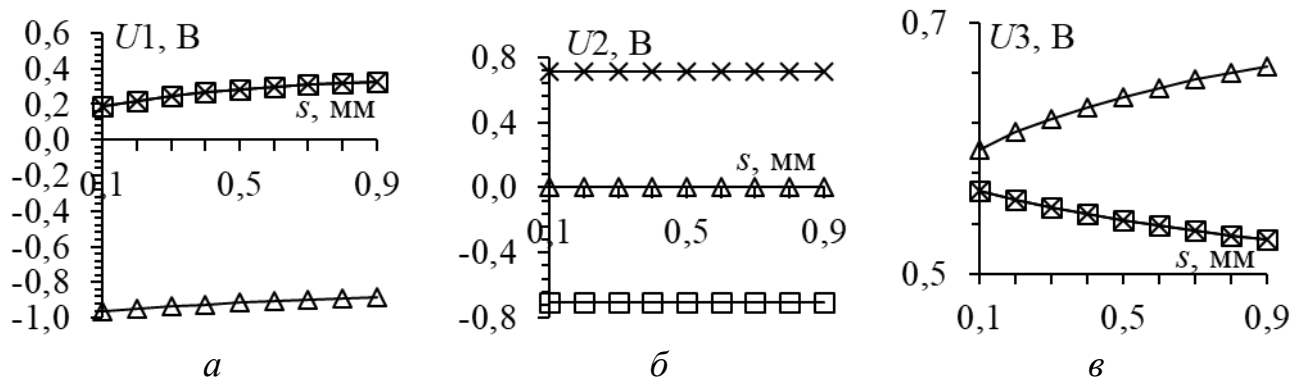


Рисунок 3.55 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=35$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.56 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=35$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,08 В до 0,5 В, а первого – уменьшается с 2,42 В до 1,74 В.

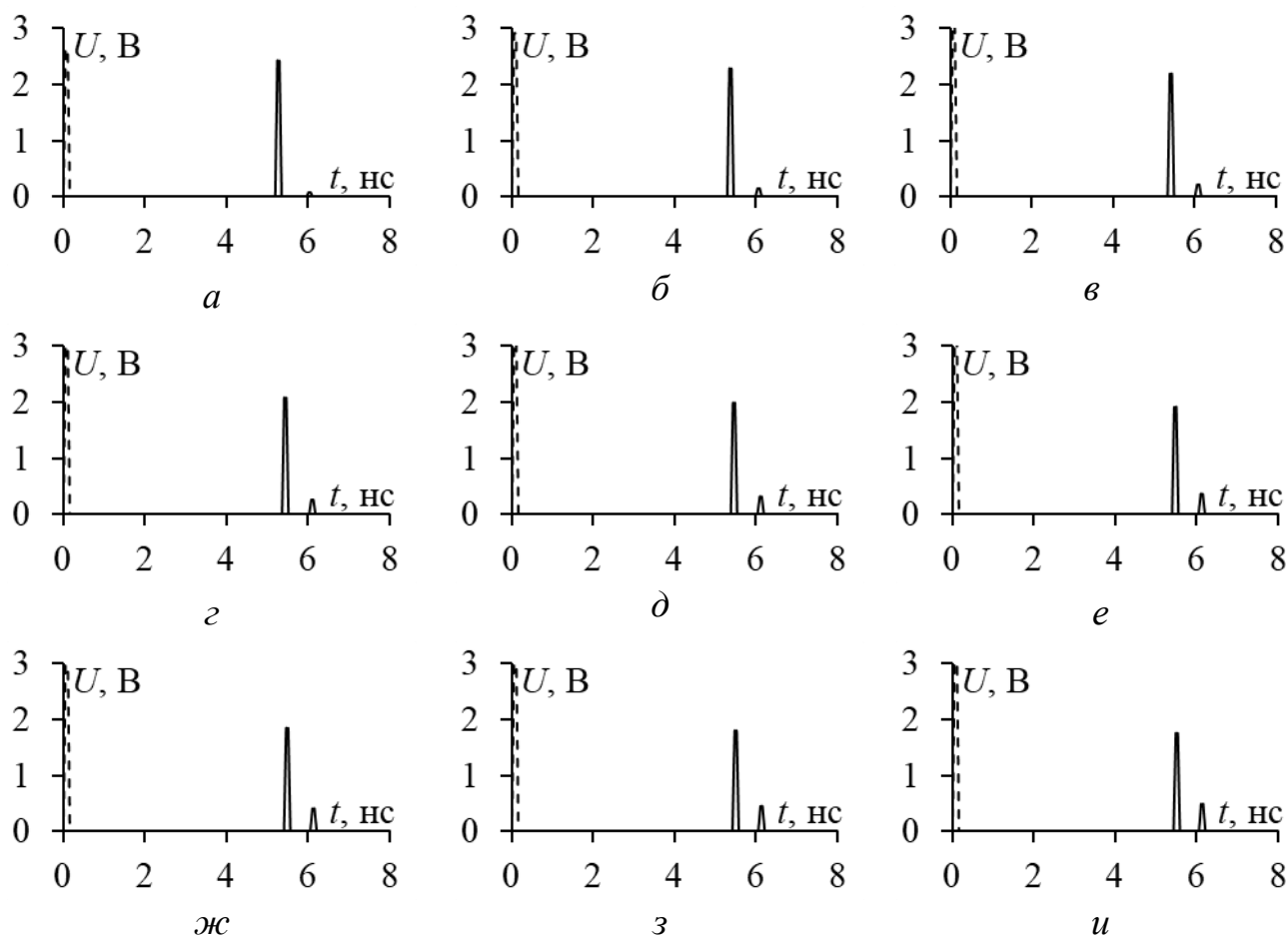


Рисунок 3.56 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и)  
 для  $t=35$  мкм

В таблице 3.16 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=35$  мкм. Они больше.

Таблица 3.16 – Отклонения  $\tau$  при  $t=35$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	3	3,9	4,3	4,6	4,7	4,9	5,1	5,2	5,4
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	18,2	17,5	17,4	17,5	17,6	17,6	17,6	17,5	17,5

На рисунках 3.57 и 3.58 представлены аналогичные зависимости для  $t=70$  мкм. Изменения незначительны.

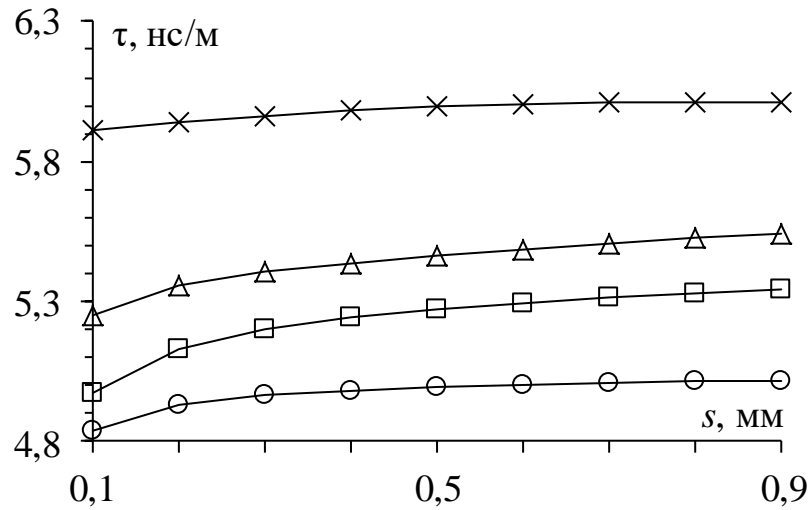


Рисунок 3.57 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $t=70$  мкм

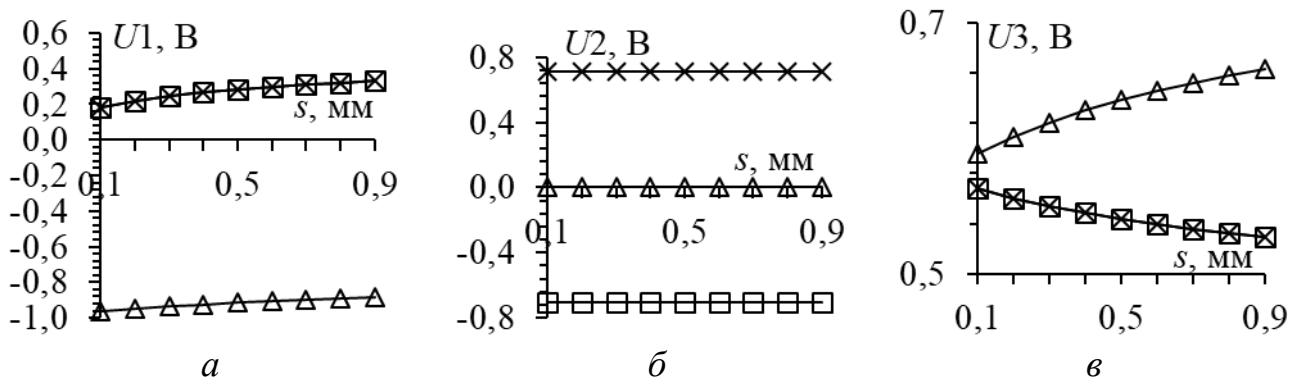


Рисунок 3.58 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=70$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.59 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=70$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,02 В до 0,5 В, а первого – уменьшается с 2,42 В до 1,64 В.

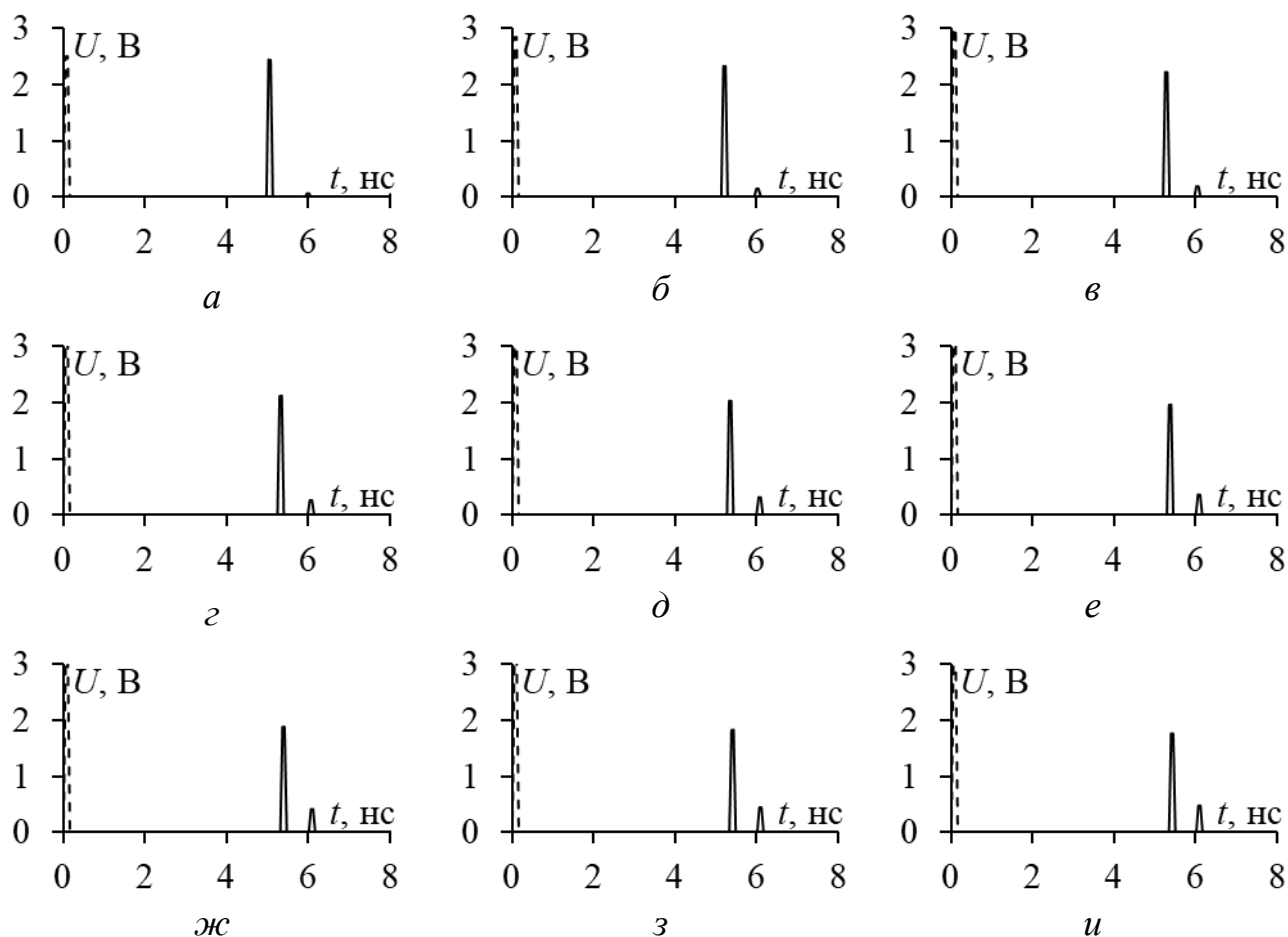


Рисунок 3.59 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $t=70$  мкм

В таблице 3.17 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=70$  мкм. Они больше.

Таблица 3.17 – Отклонения  $\tau$  при  $t=70$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	2,7	4	4,8	5,2	5,6	5,9	6,1	6,3	6,4
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	22,1	20,4	20,1	20,1	20,1	20,1	20	20	20

На рисунках 3.60 и 3.61 представлены аналогичные зависимости для  $t=105$  мкм. Изменения незначительны.

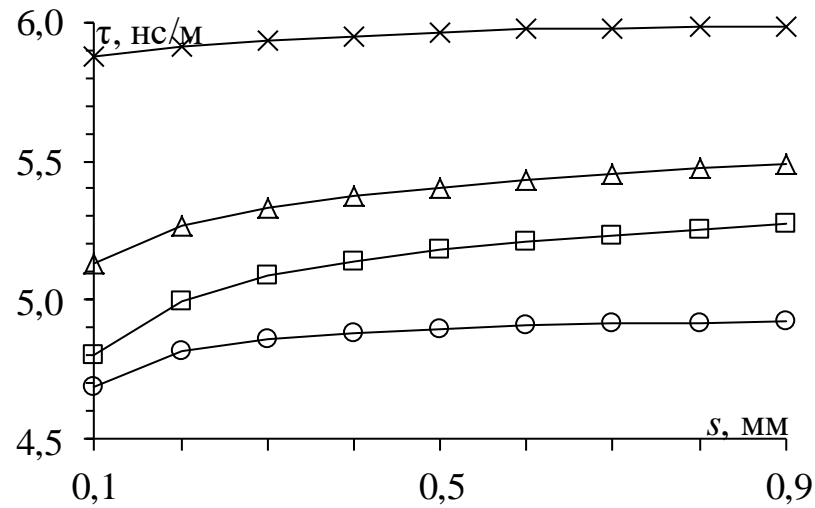


Рисунок 3.60 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$ (□),  $\tau_2$ (Δ) и  $\tau_3$ (×) от  $s$  при  $t=105$  мкм

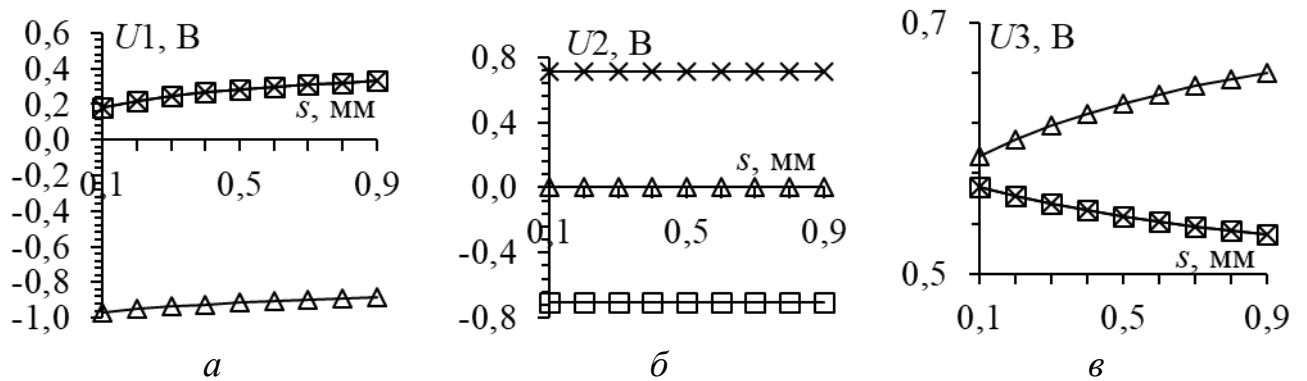


Рисунок 3.61 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=105$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.62 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=105$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,06 В до 0,48 В, а первого – уменьшается с 2,44 В до 1,79 В.



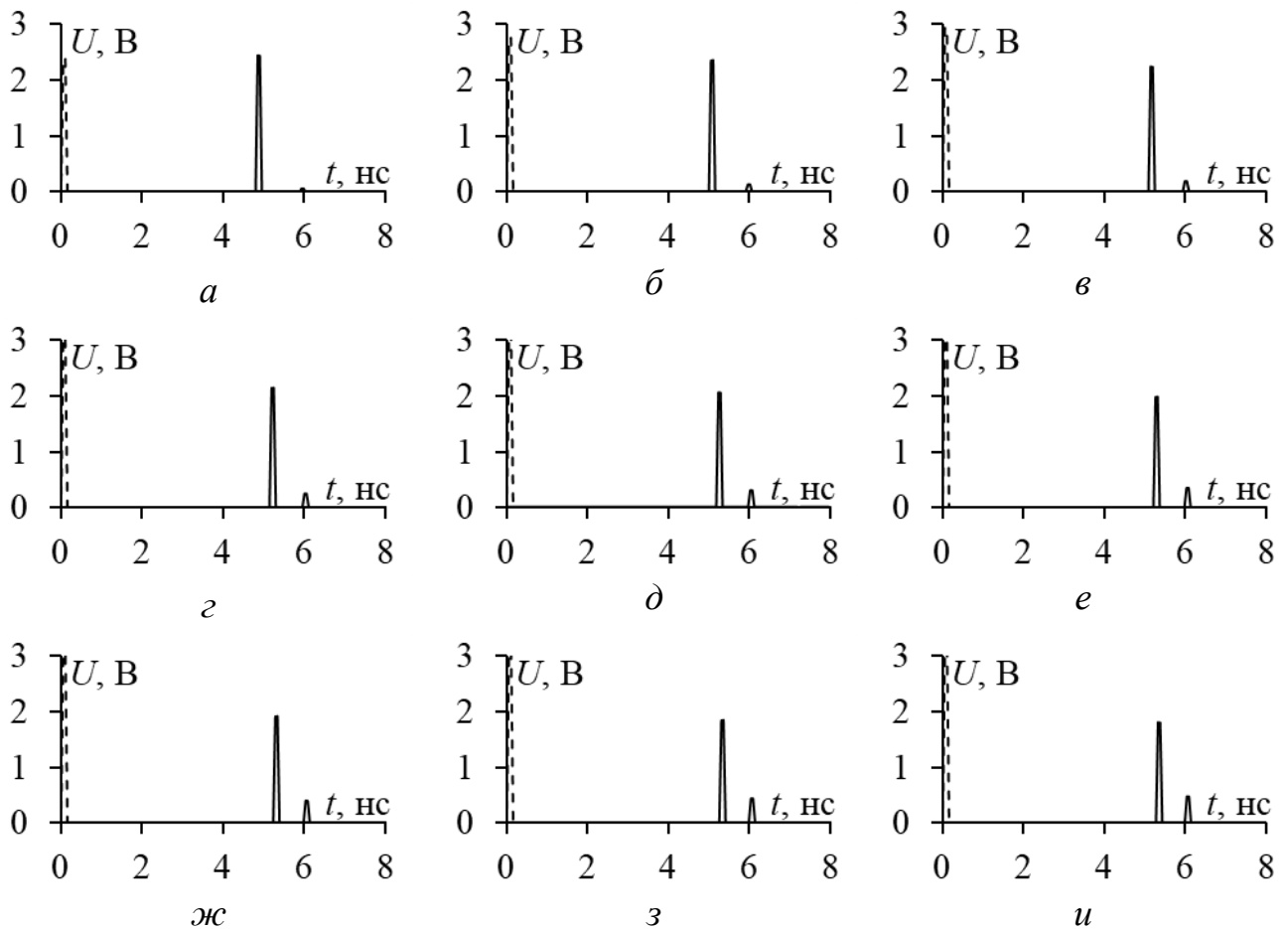


Рисунок 3.62 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $t=105$  мкм

В таблице 3.18 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=105$  мкм. Они больше и достигают 25%.

Таблица 3.18 – Отклонения  $\tau$  при  $t=105$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	2,4	3,8	4,7	5,3	5,8	6,2	6,5	6,8	7,1
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	25,4	22,7	22,1	21,9	21,8	21,8	21,7	21,6	21,5

Таким образом, проведенный анализ МПЛ с проводниками сбоку показал, что с увеличением  $s$ , при данных геометрических параметрах, возрастает амплитуда второго импульса. Это значит, что определенный выбор параметров даст возможность выравнивания амплитуд импульсов и применения линии в качестве модального фильтра.

Выполнено аналогичное сравнение для поперечного сечения из рисунка 3.63.

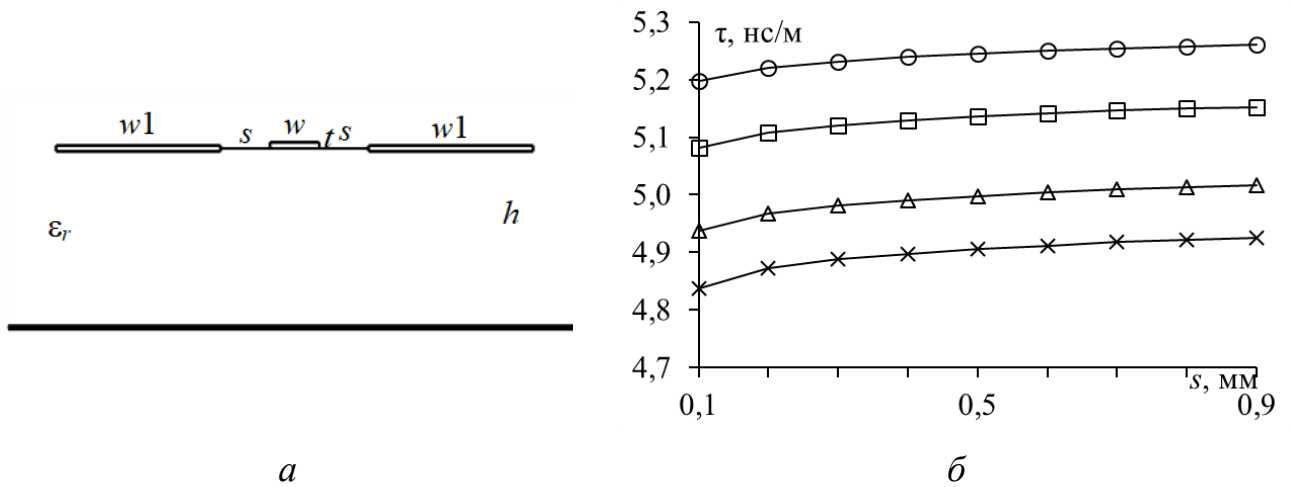


Рисунок 3.63 – Поперечное сечение МПЛ с проводниками посреди границы воздух–подложка (а) и зависимости  $\tau$  от  $s$  при  $t=18$  (○), 35 (□), 70 (Δ) и 105 (×) мкм (б)

При расположении проводников посреди границы воздух-подложка значения  $\tau$  возрастают. Для определения влияния проводников выполнены аналогичные вычисления при  $s=0,1-0,9$  мм и  $t=18, 35, 70$  и 105 мкм.

По полученным результатам для  $t=18$  мкм (рисунок 3.64) видно, что с увеличением  $s$  значения  $\tau$  возрастают.

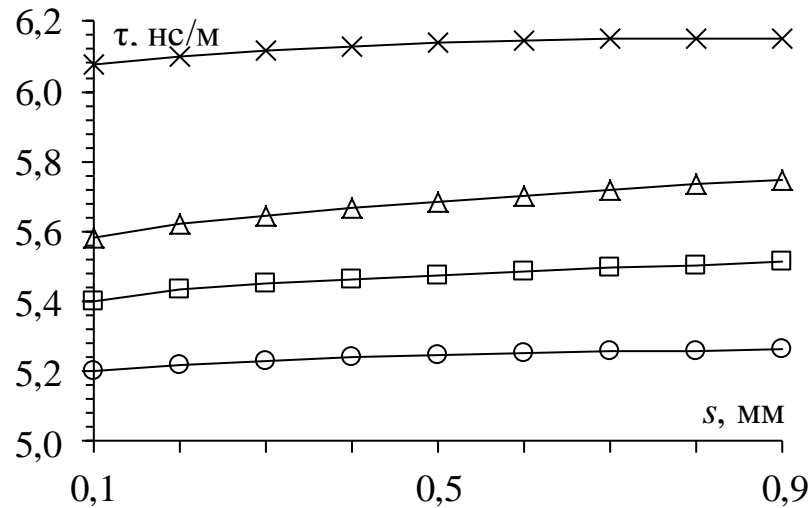


Рисунок 3.64 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $t=18$  мкм

На рисунке 3.65 представлены собственные векторы напряжений. Как видно, для  $\tau_1$  и  $\tau_3$  они слабо меняются с ростом  $s$ , а для  $\tau_2$  неизменны. Для  $\tau_3$  при  $s=0,1$  мм графики пересекаются.

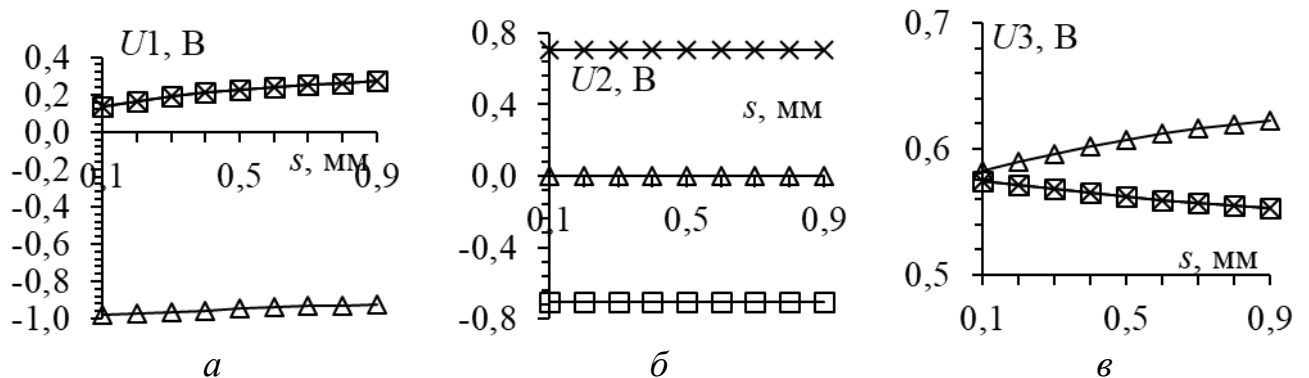


Рисунок 3.65 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=18$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.66 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=18$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,05 В до 0,35 В, а первого – уменьшается с 2,44 В до 1,85 В.

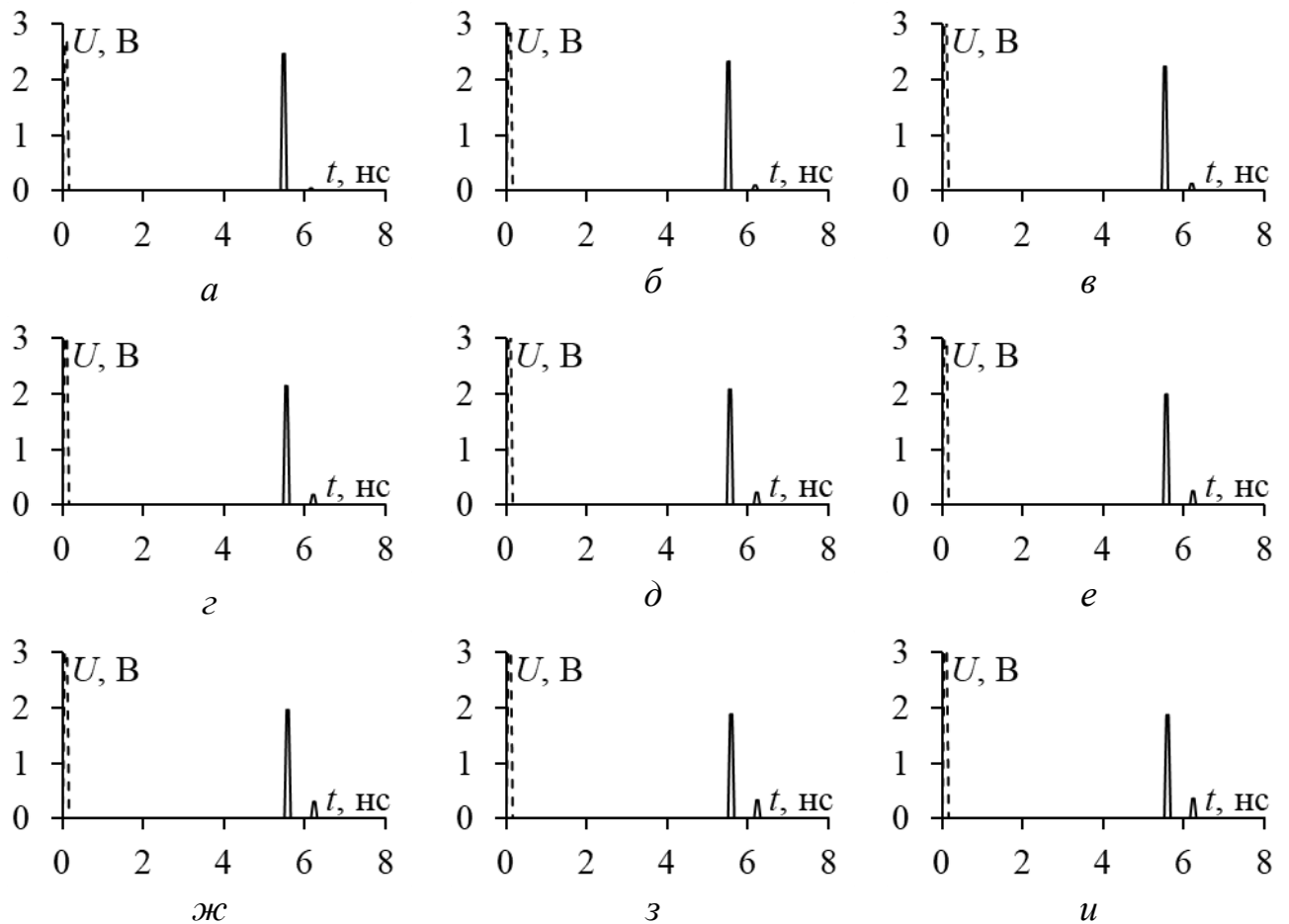


Рисунок 3.66 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $t=18$  мкм

В таблице 3.19 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=18$  мкм. Они достигают 17%, но изменения незначительны.

Таблица 3.19 – Отклонения  $\tau$  при  $t=18$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	3,86	4,08	4,19	4,28	4,37	4,46	4,57	4,69	4,81
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	16,91	16,8	16,9	17	17	17	17	17	17

На рисунках 3.67 и 3.68 представлены аналогичные зависимости для  $t=35$  мкм. Изменения незначительны, за исключением того, что графики собственных значений сильно сблизилась и перекрещиваются около  $s=0,4$  мм.

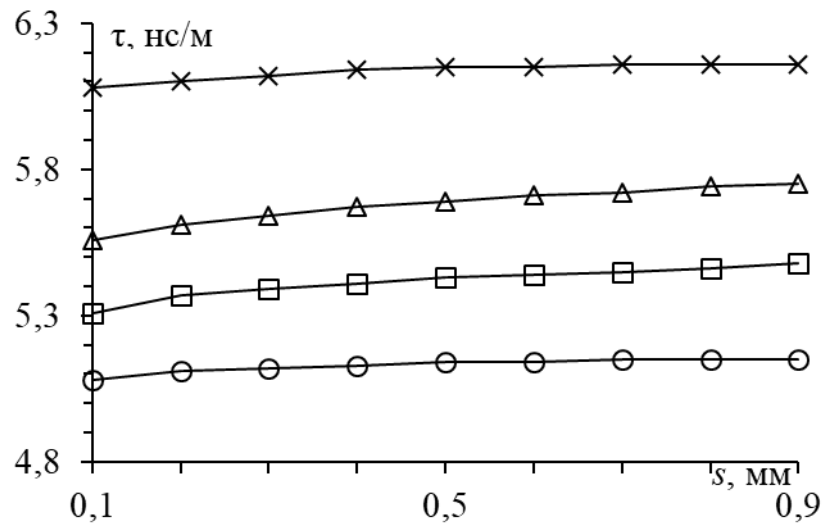


Рисунок 3.67 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $t=35$  мкм

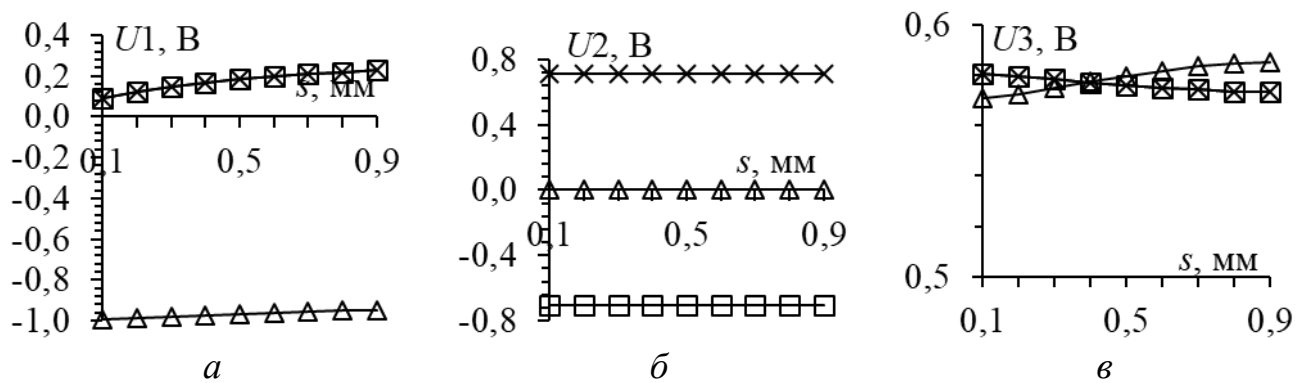


Рисунок 3.68 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=35$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.69 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=35$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,05 В до 0,32 В, а первого – уменьшается с 2,45 В до 1,90 В.

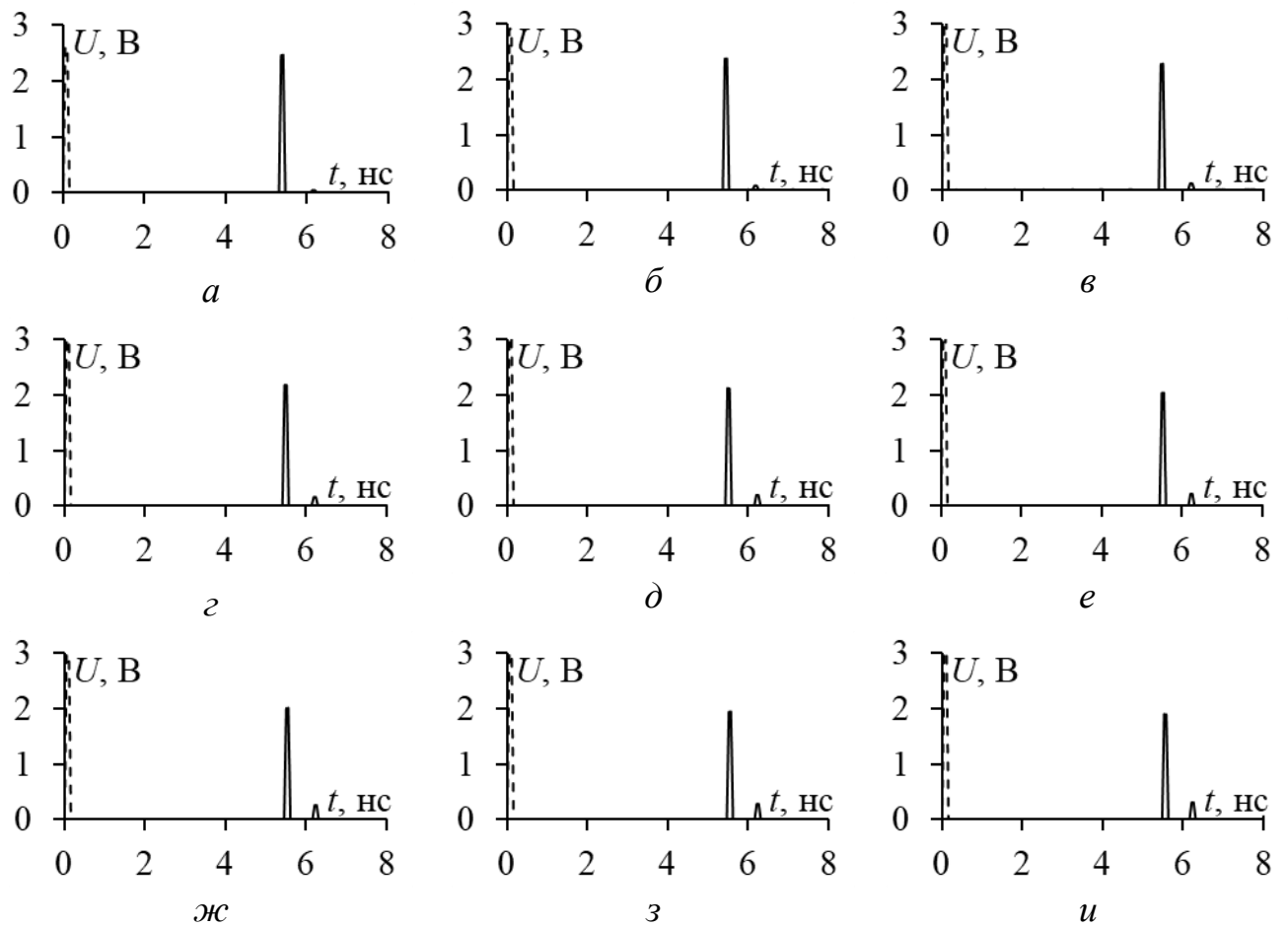


Рисунок 3.69 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)

при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з),  $0,9$  (и)

для  $t=35$  мкм

В таблице 3.20 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=35$  мкм. Отклонения  $\tau_1$  продолжают возрастать, а  $\tau_3$  – убывать.

Таблица 3.20 – Отклонения  $\tau$  при  $t=35$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	9,5	9,9	10,2	10,5	10,7	11	11,2	11,4	11,6
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,6	19,5	19,5

На рисунках 3.70 и 3.71 представлены аналогичные зависимости для  $t=70$  мкм. Изменения незначительны.

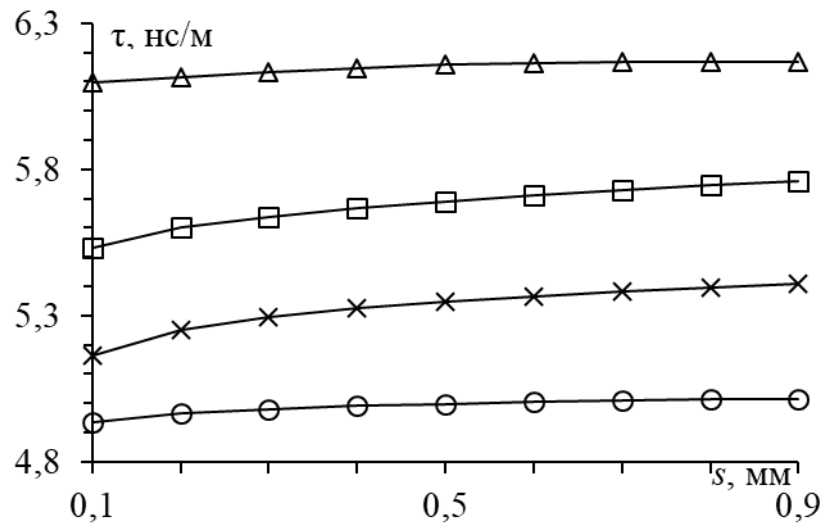


Рисунок 3.70 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $t=70$  мкм

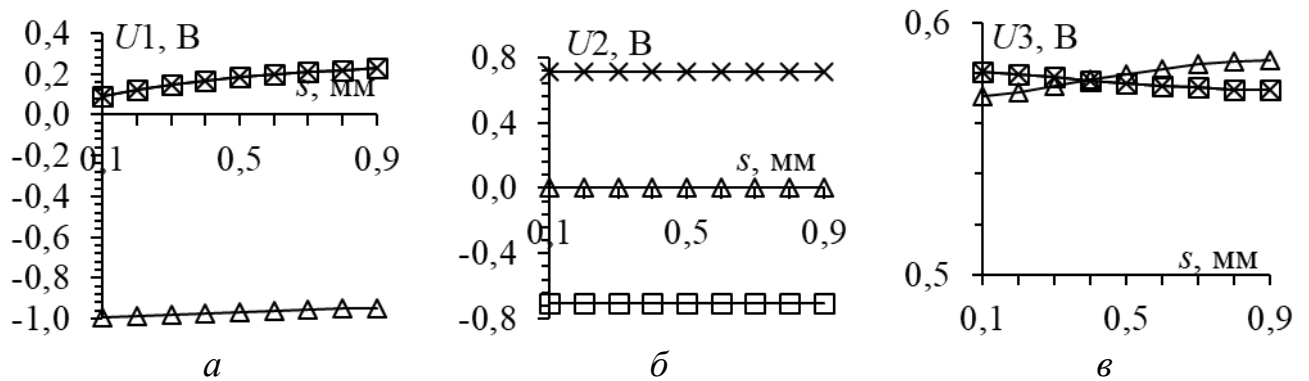


Рисунок 3.71 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=70$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.72 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=70$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,04 В до 0,26 В, а первого – уменьшается с 2,41 В до 1,99 В.

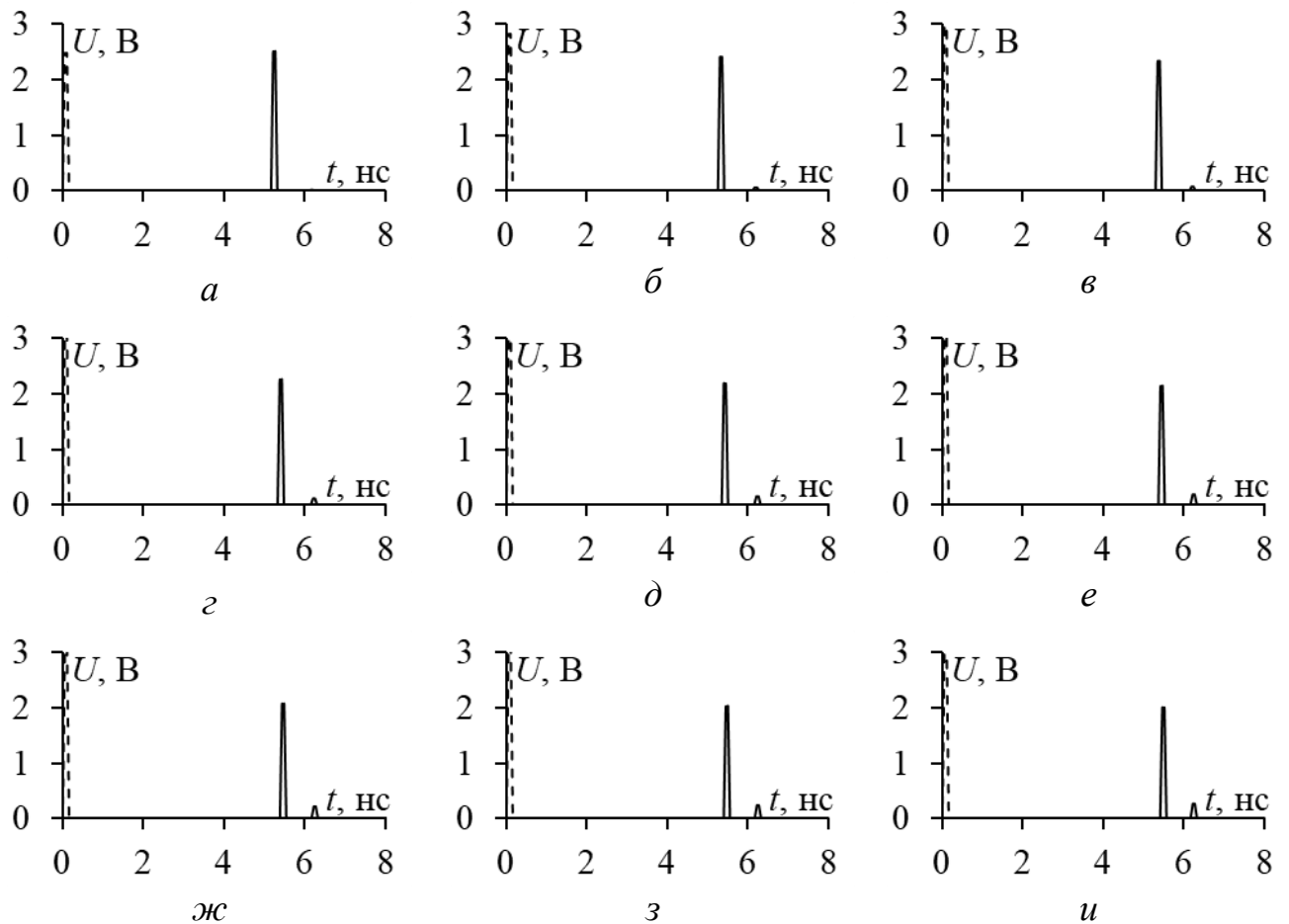


Рисунок 3.72 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $t=70$  мкм

В таблице 3.21 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=70$  мкм. Изменения аналогичны.

Таблица 3.21 – Отклонения  $\tau$  при  $t=70$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	12	12,8	13,2	13,5	13,8	14,1	14,4	14,6	14,8
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	23,4	23,1	23,1	23,2	23,2	23,2	23,1	23,0	22,9

На рисунках 3.73 и 3.74 представлены аналогичные зависимости для  $t=105$  мкм. Изменения незначительны, кроме элементов собственных векторов  $\tau_3$ , где точка перекрещивания графиков не видна, поскольку переместилась в область больших значений  $s$ .



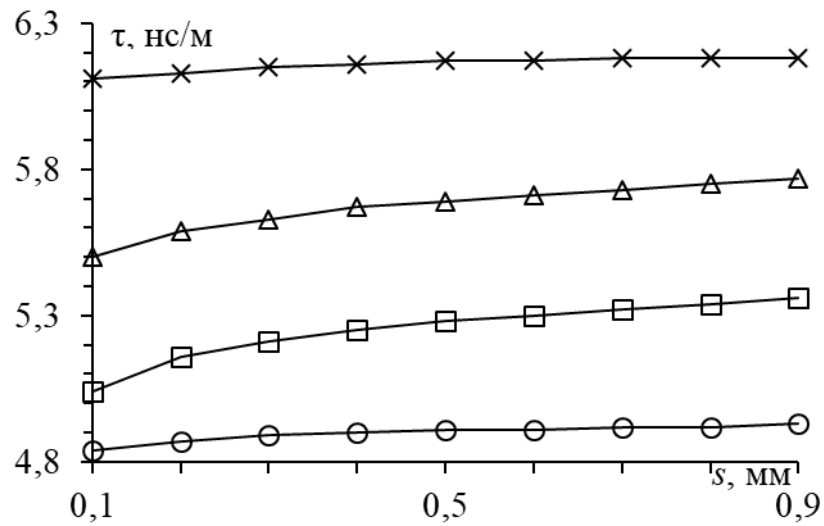


Рисунок 3.73 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $t=105$  мкм

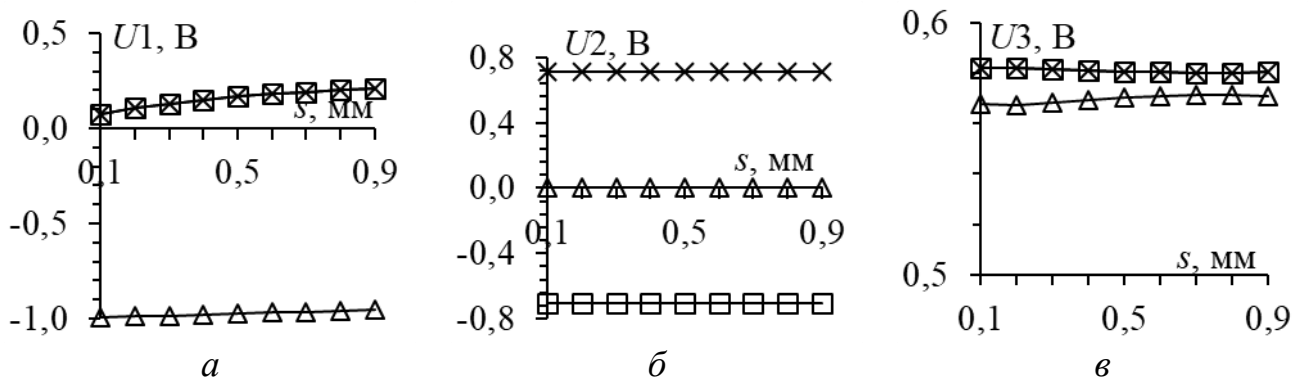


Рисунок 3.74 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=105$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.75 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=105$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,03 В до 0,23 В, а первого – уменьшается с 2,49 В до 2,05 В.

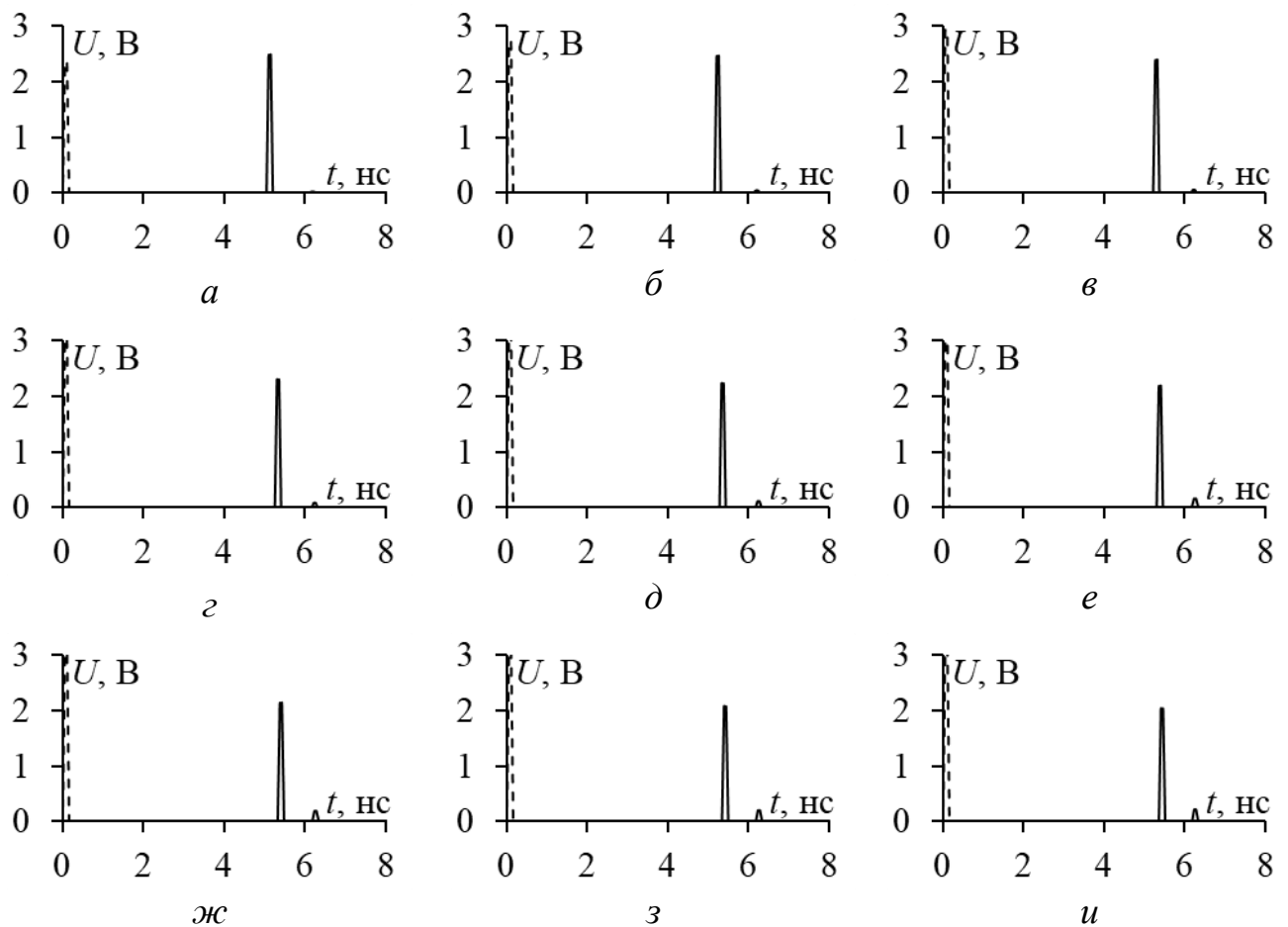


Рисунок 3.75 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (*a*),  $0,2$  (*б*),  $0,3$  (*в*),  $0,4$  (*г*),  $0,5$  (*д*),  $0,6$  (*е*),  $0,7$  (*ж*),  $0,8$  (*з*) и  $0,9$  (*и*) для  $t=105$  мкм

В таблице 3.22 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=105$  мкм. Изменения незначительны.

Таблица 3.22 – Отклонения  $\tau$  при  $t=105$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	4,3	5,8	6,7	7,2	7,6	7,9	8,2	8,5	8,7
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	26,3	25,8	25,7	25,7	25,7	25,7	25,6	25,5	25,4

Таким образом, проведенный анализ МПЛ с проводниками посреди границы воздух–подложка показал аналогичные результаты, как и в подразделе 2.3.

Выполнено аналогичное сравнение для поперечного сечения из рисунка 3.76.

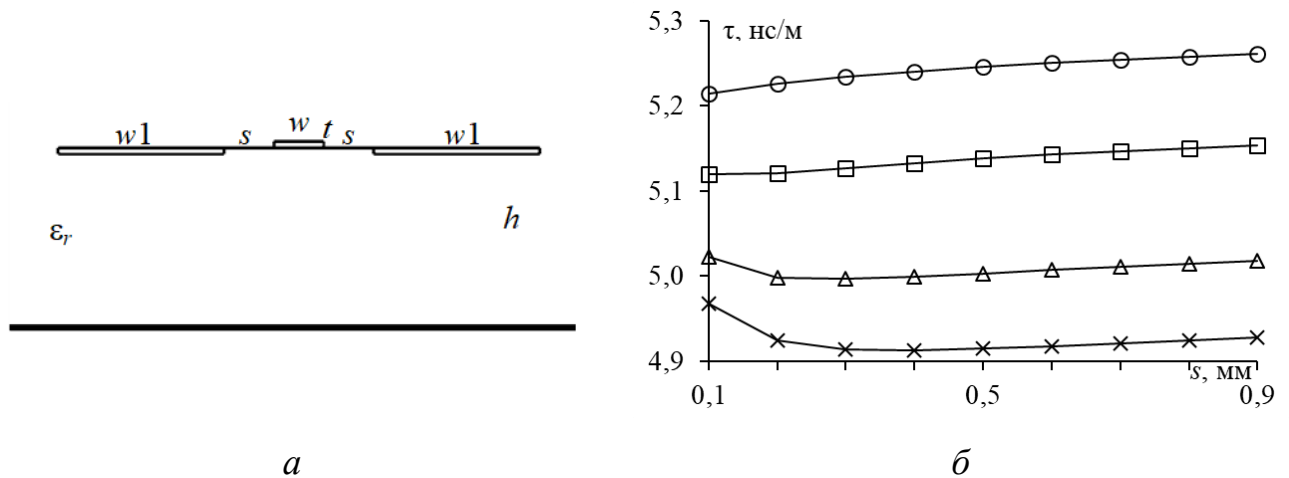


Рисунок 3.76 – Поперечное сечение МПЛ с проводниками под границей воздух–подложка (а) и зависимости  $\tau$  от  $s$  при  $t=18$  ( $\circ$ ),  $35$  ( $\square$ ),  $70$  ( $\Delta$ ) и  $105$  ( $\times$ ) мкм (б)

При расположении проводников под границей воздух–подложка значения  $\tau$  ведут себя несколько иначе (рисунок 3.76). Для определения влияния проводников вычисления выполнены при  $s=0,1-0,9$  мм и  $t=18, 35, 70$  и  $105$  мкм.

По результатам для  $t=18$  мкм (рисунок 3.77) видно, что с увеличением  $s$  значения  $\tau$  слабо возрастают.

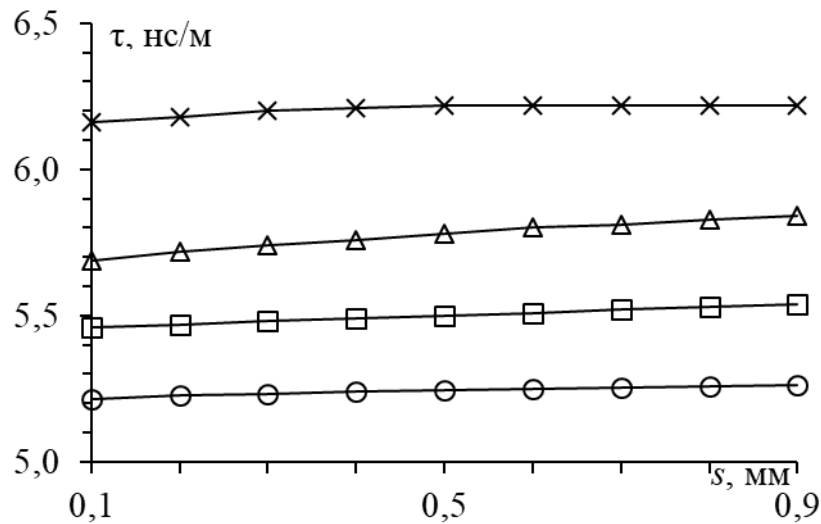


Рисунок 3.77 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $t=18$  мкм

На рисунке 3.78 представлены собственные векторы напряжений. Как видно, для  $\tau_1$  и  $\tau_3$  они слабо меняются с ростом  $s$ , а для  $\tau_2$  неизменны. Также видно, что для  $\tau_3$  зависимости пересекаются при  $s=0,5$  мм.

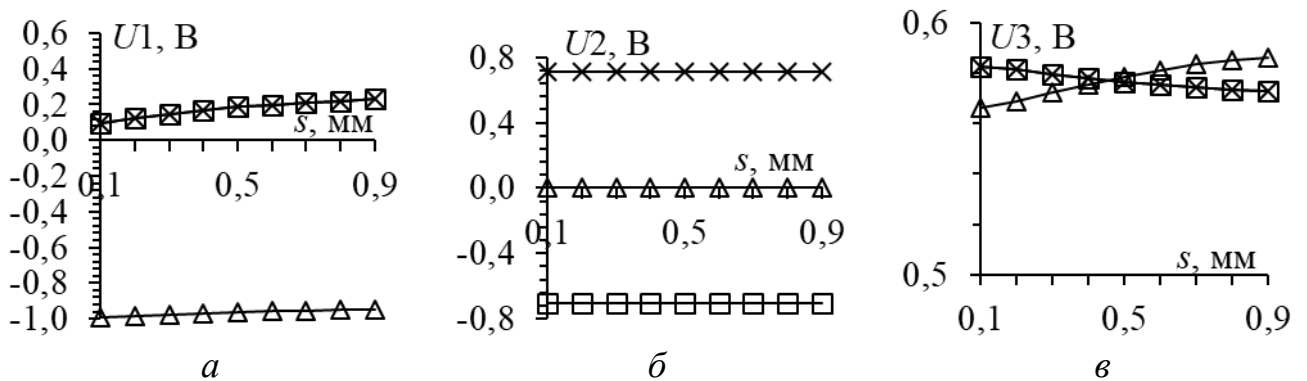


Рисунок 3.78 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=18$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.79 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=18$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,03 В до 0,14 В, а первого – уменьшается с 2,46 В до 1,94 В.

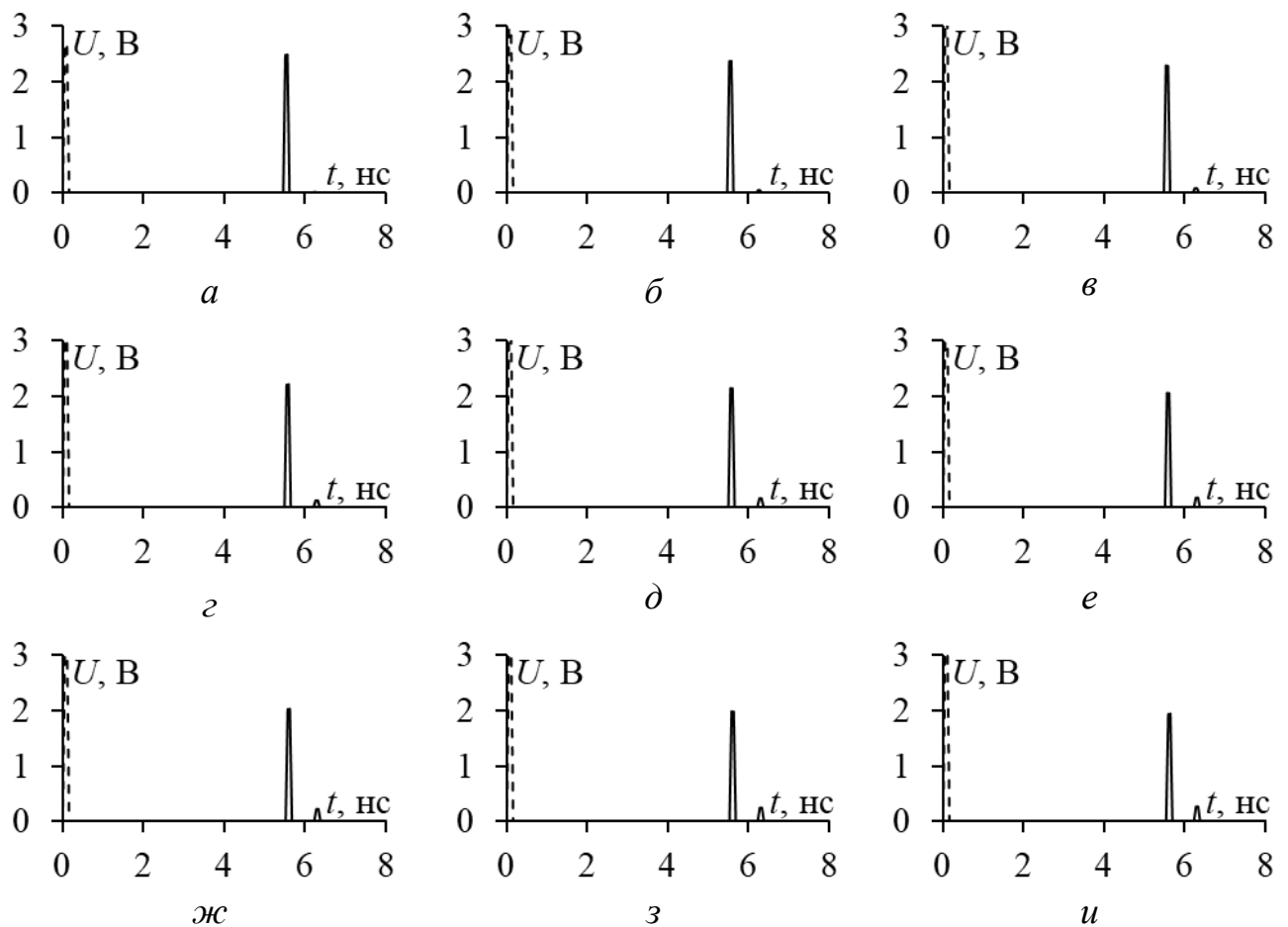


Рисунок 3.79 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з),  $0,9$  (и)  
для  $t=18$  мкм

В таблице 3.23 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=18$  мкм. Отклонения  $\tau_1$  с увеличением  $s$  возрастают, а  $\tau_3$  – возрастают, а при  $s=0,8 - 0,9$  мм уменьшаются.

Таблица 3.23 – Отклонения  $\tau$  при  $t=18$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0)*100\%$	4,7	4,7	4,7	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,3
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0)*100\%$	18,2	18,3	18,4	18,5	18,5	18,5	18,5	18,4	18,3

На рисунках 3.80 и 3.81 представлены аналогичные зависимости для  $t=35$  мкм. Изменения незначительны, за исключением отсутствия пересечения графиков для  $\tau_3$ .

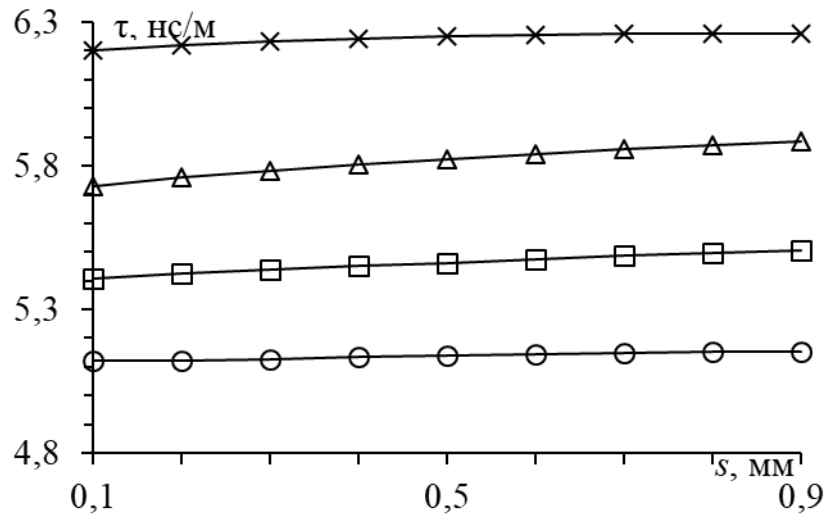


Рисунок 3.80 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $t=35$  мкм

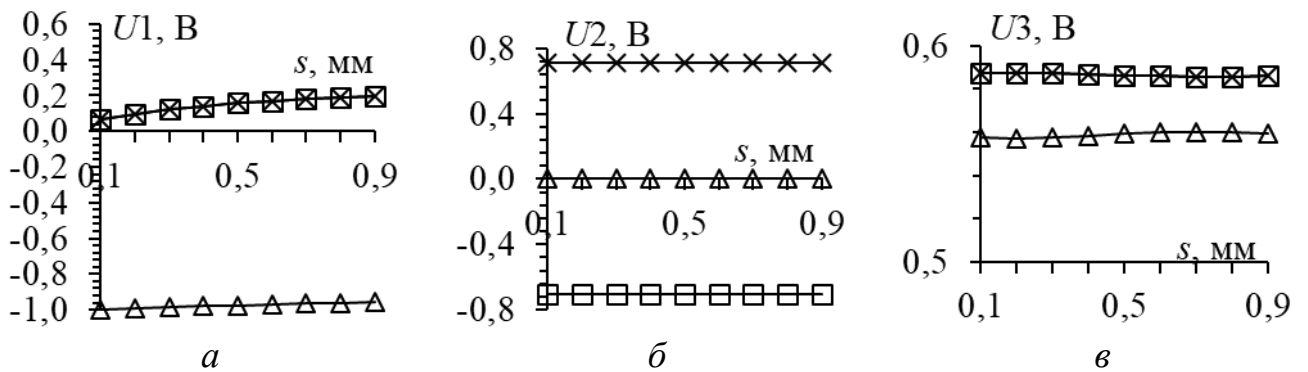


Рисунок 3.81 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=35$  мкм для  $\tau_1$  ( $a$ ),  $\tau_2$  ( $б$ ) и  $\tau_3$  ( $в$ )

На рисунке 3.82 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=35$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса увеличивается с 0,01 В до 0,22 В, а первого – уменьшается с 2,48 В до 2,01 В.

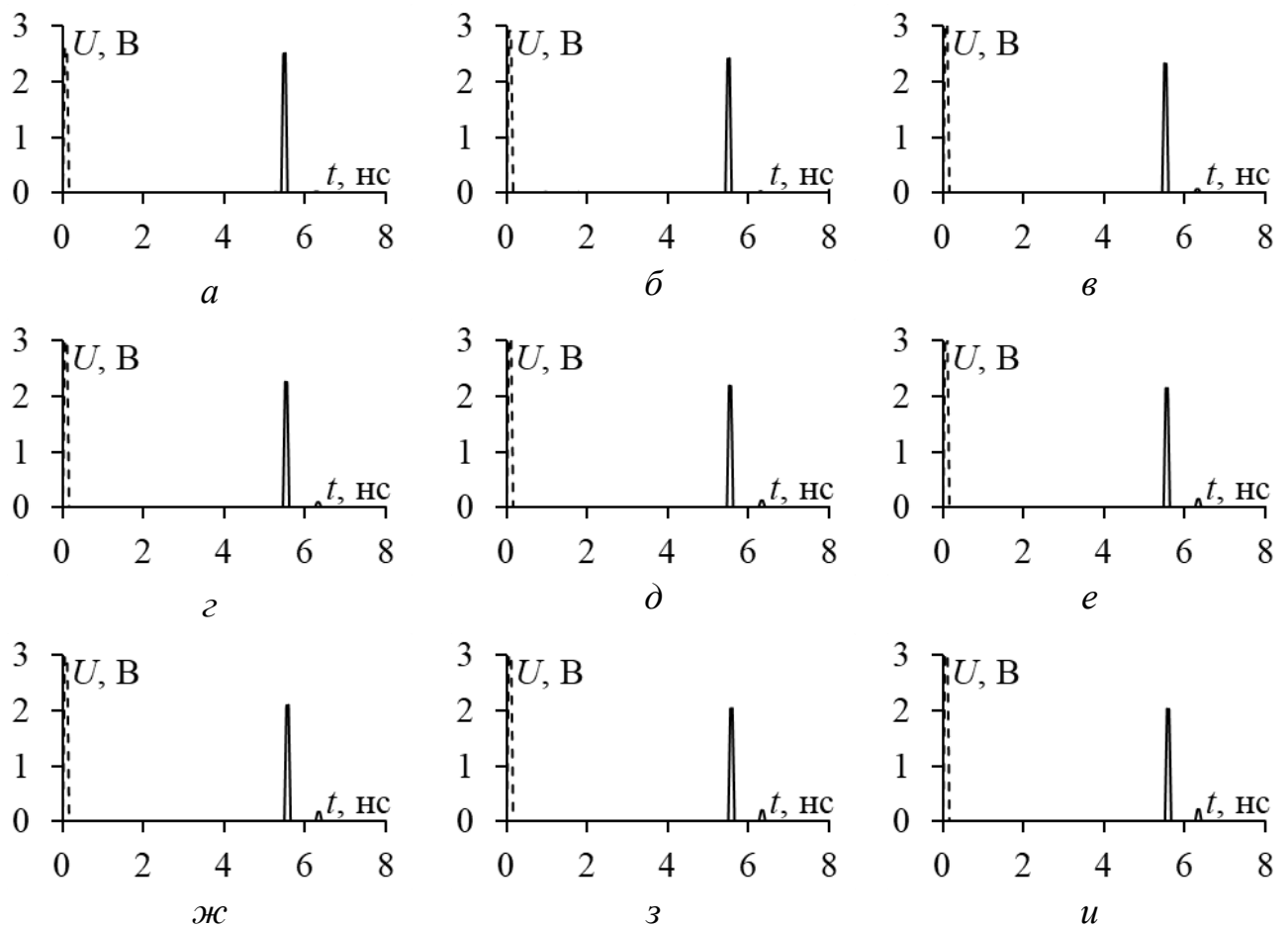


Рисунок 3.82 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з),  $0,9$  (и)  
 для  $t=35$  мкм

В таблице 3.24 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=35$  мкм. Тенденции прежние.

Таблица 3.24 – Отклонения  $\tau$  при  $t=35$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	5,7	5,9	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6	6,7	6,9
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	21,1	21,4	21,6	21,6	21,7	21,7	21,6	21,5	21,4

На рисунках 3.83 и 3.84 представлены аналогичные зависимости для  $t=70$  мкм. Изменения незначительны, кроме элементов собственного вектора  $\tau_3$ , отклонение которых увеличилось.

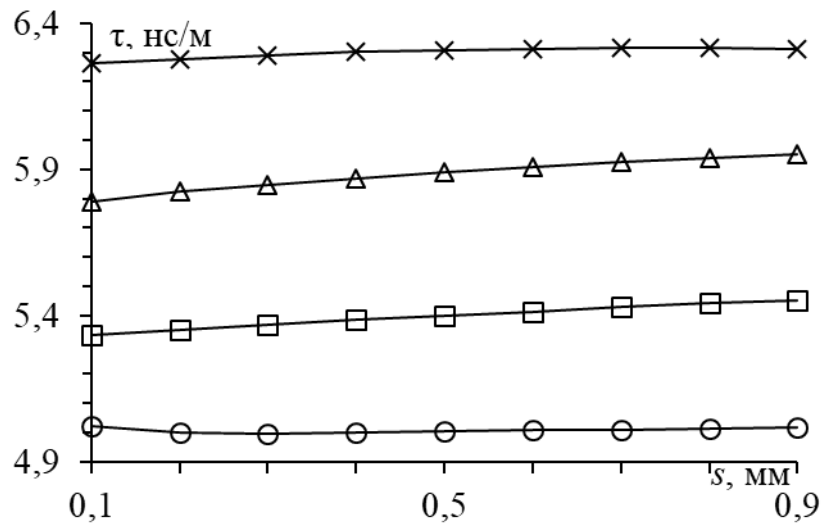


Рисунок 3.83 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $t=70$  мкм

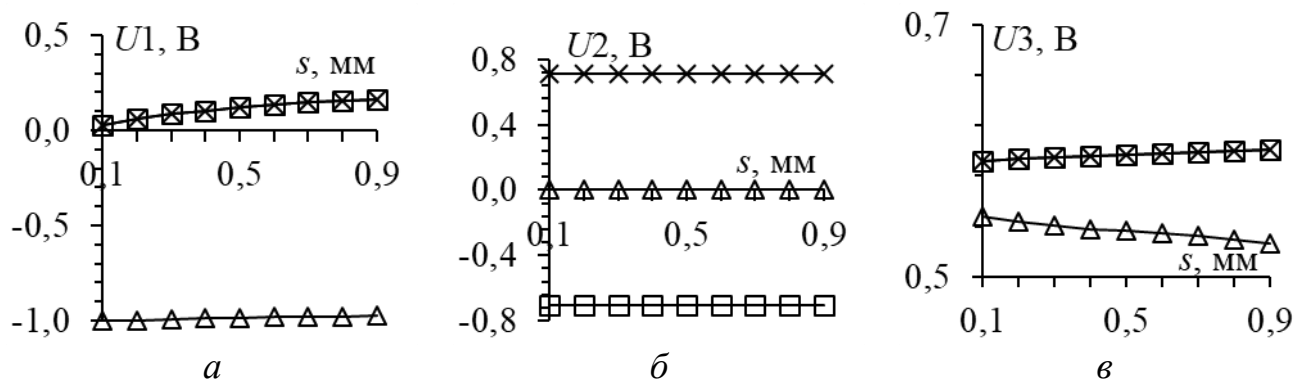


Рисунок 3.84 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=70$  мкм для  $\tau_1$  ( $a$ ),  $\tau_2$  ( $б$ ) и  $\tau_3$  ( $в$ )

На рисунке 3.85 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=70$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно увеличивается с 0,02 В до 0,15 В, а первого – уменьшается с 2,51 В до 2,09 В.



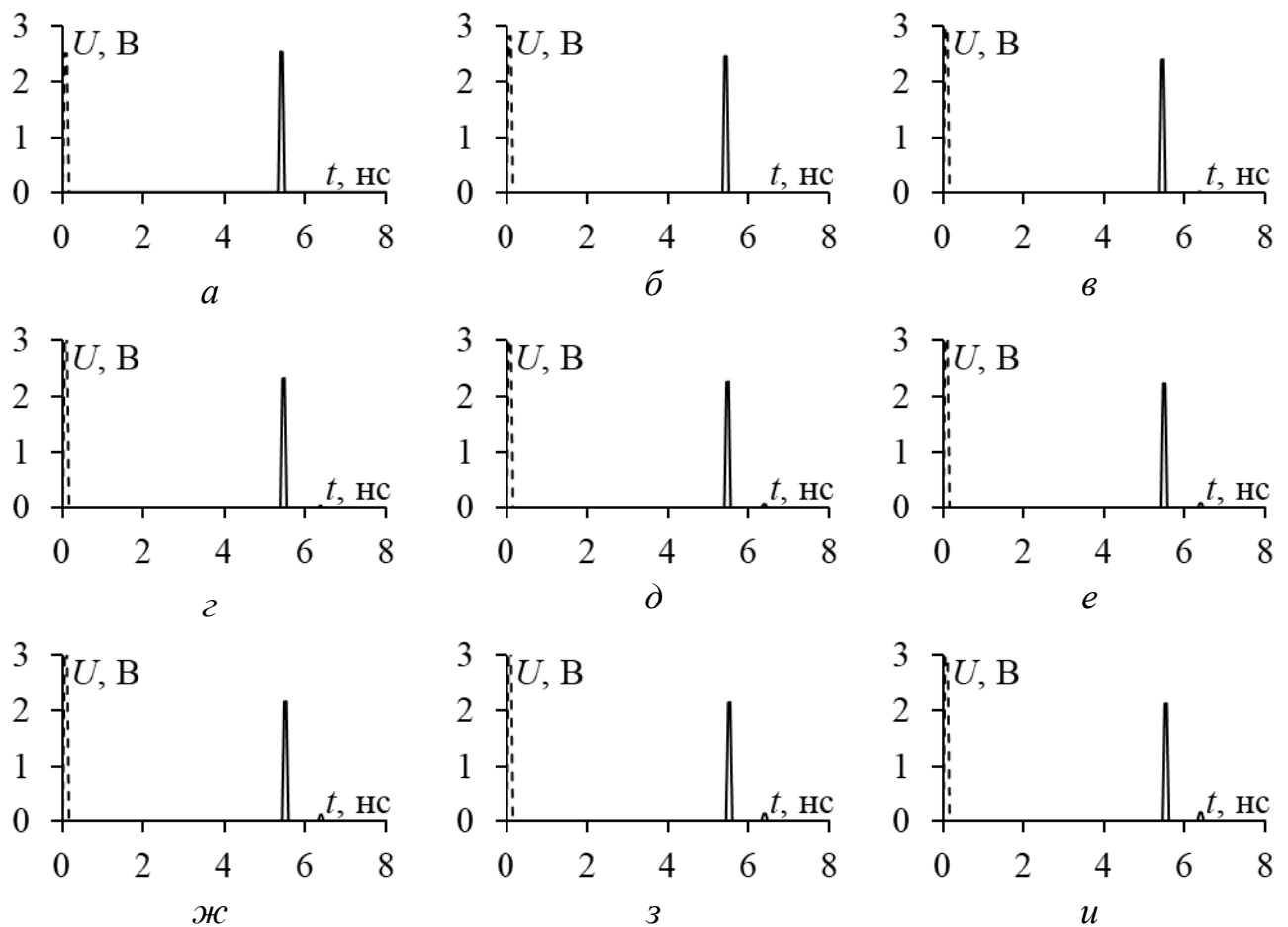


Рисунок 3.85 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и)  
для  $t=70$  мкм

В таблице 3.23 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=70$  мкм. Изменения значительны и в разные стороны.

Таблица 3.25 – Отклонения  $\tau$  при  $t=70$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	6,2	7,1	7,5	7,7	7,9	18	18,2	18,4	18,7
$( \tau_0-\tau_3 /\tau_0)*100\%$	24,7	25,6	25,9	26	26,1	8,1	8,3	8,5	8,7

На рисунках 3.86 и 3.87 представлены аналогичные зависимости для  $t=105$  мкм. Изменения незначительны, кроме элементов собственного вектора  $\tau_3$ , отклонение которых увеличивается.

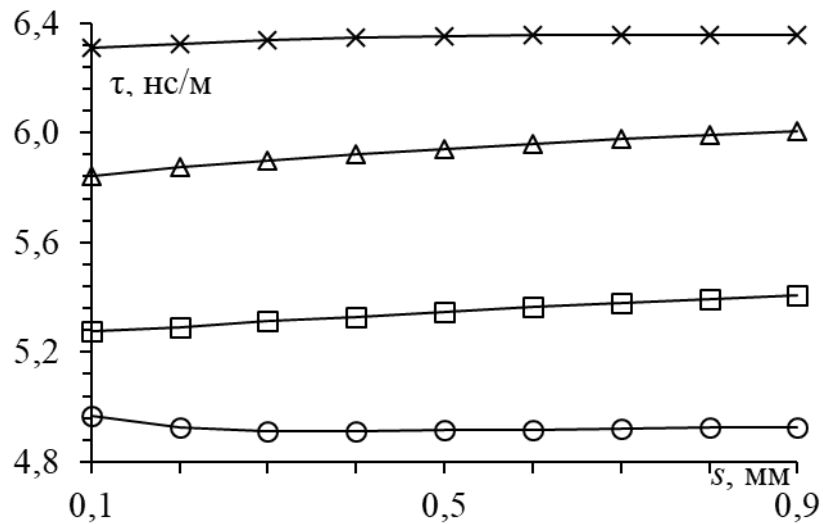


Рисунок 3.86 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $t=105$  мкм

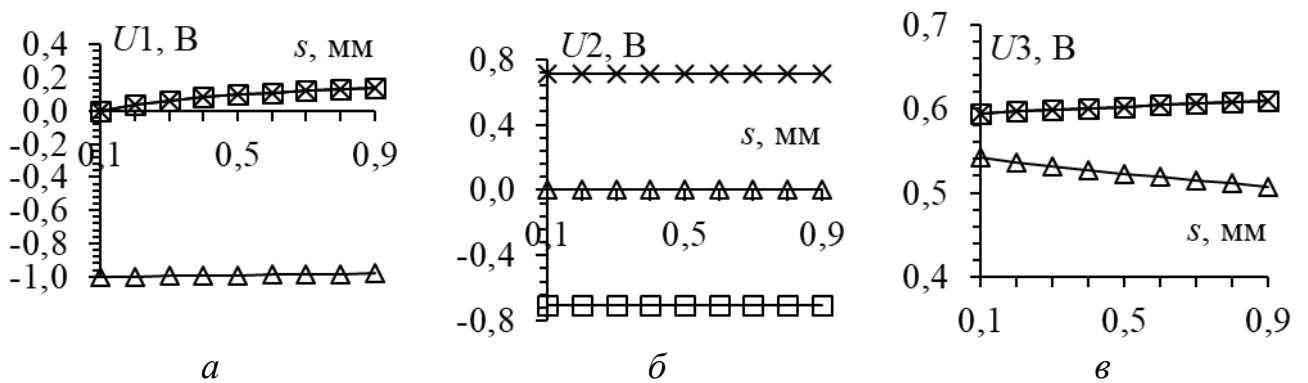


Рисунок 3.87 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $t=105$  мкм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.88 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $t=105$  мкм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно увеличивается с 0 В до 0,11 В, а первого – уменьшается с 2,51 В до 2,15 В.

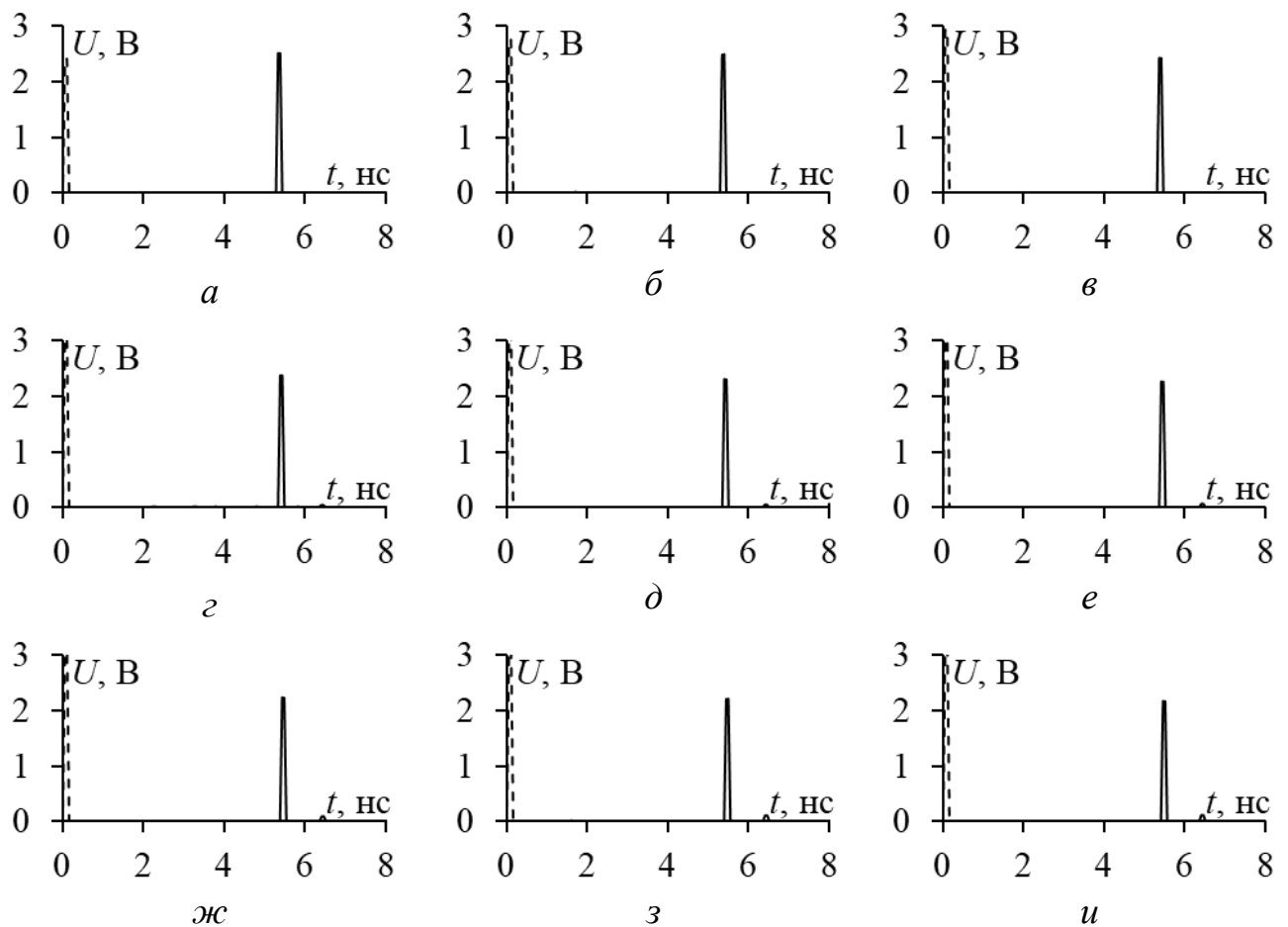


Рисунок 3.88 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $t=105$  мкм

В таблице 3.26 представлены отклонения  $\tau$  для  $t=105$  мкм. Изменения незначительны.

Таблица 3.26 – Отклонения  $\tau$  при  $t=105$  мкм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	6,2	7,5	8,1	8,5	8,8	9,1	9,3	9,5	9,7
$( \tau_0 - \tau_3 /\tau_0) * 100\%$	27	28,4	29	29,2	29,2	29,2	29,2	29,1	29

Таким образом, проведенный анализ МПЛ с проводниками под границей воздух–подложка, показал аналогичные результаты.

Выполнено аналогичное сравнение результатов для рисунка 3.89.

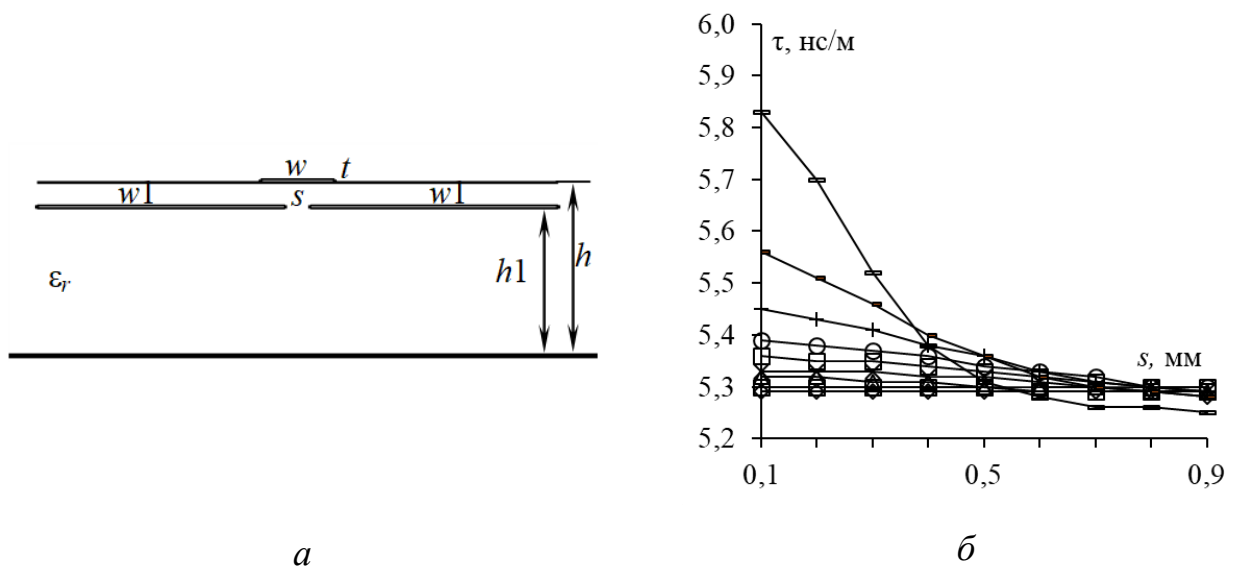


Рисунок 3.89 – Поперечное сечение МПЛ с проводниками, углубленными в подложку (а) и зависимости  $\tau$  от  $s$

при  $h1=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,4$  ( $\times$ ),  $0,5$  ( $\square$ ),  $0,6$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $+$ ),  $0,8$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $-$ ) мм

При углублении проводников в подложку значения  $\tau$  сильно меняются. В частности, это вызвано и тем, что здесь  $s$  обозначает расстояние между проводниками, а не до полоски. Для определения влияния проводников вычисления выполнены при  $s=0,1-0,9$  мм и изменении  $h1$  от  $0,9$  мм до  $0,1$  мм с шагом  $0,1$  мм.

По полученным результатам для  $h1=0,9$  мм (рисунок 3.90) видно, что с увеличением  $s$  значения  $\tau$  убывают довольно резко из-за близости проводников к границе воздух–подложка.

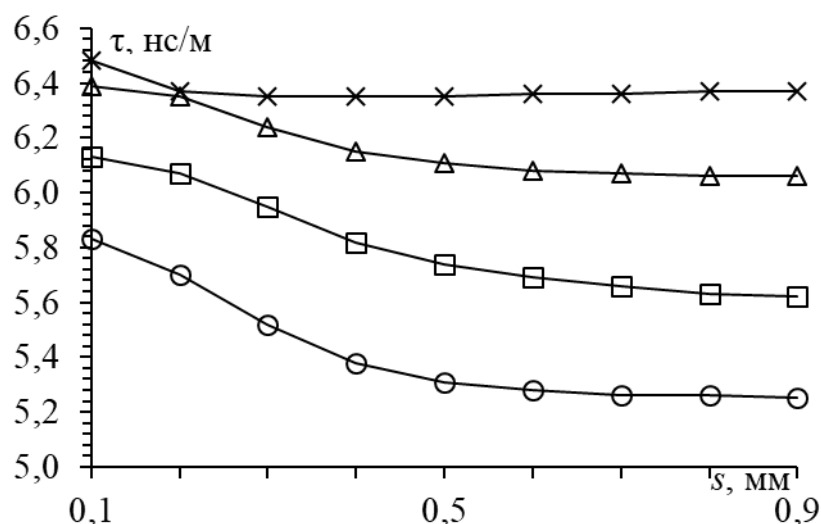


Рисунок 3.90 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,9$  мм

На рисунке 3.91 представлены собственные векторы напряжений. Третья мода, условно называемая дифференциальной, становится самой медленной, поскольку проводники теперь уже не в воздухе и не у границы, а погружаются в диэлектрик.

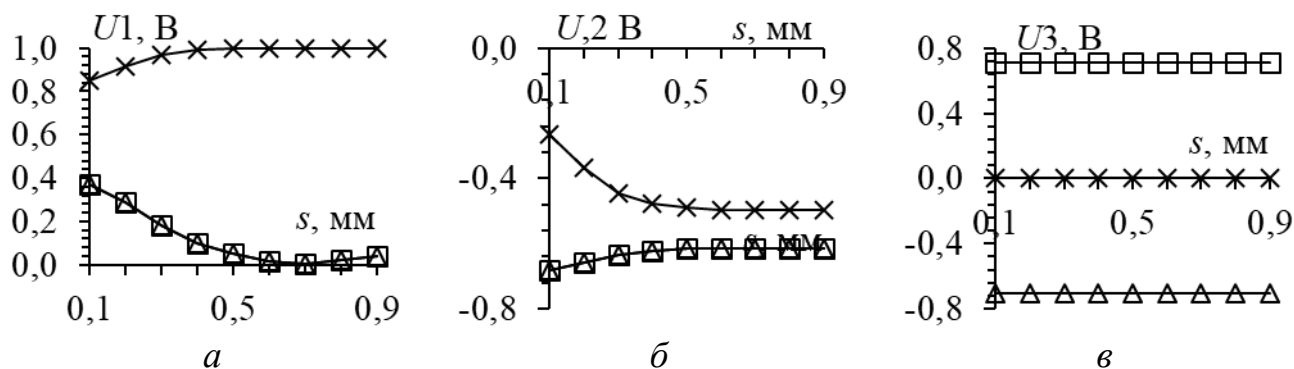


Рисунок 3.91 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,9$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.92 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,9$  мм. Видно, что СКИ разлагается на импульсы. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса уменьшается с 0,75 В до 0,01 В, а первого – увеличивается с 1,64 В до 2,35 В.

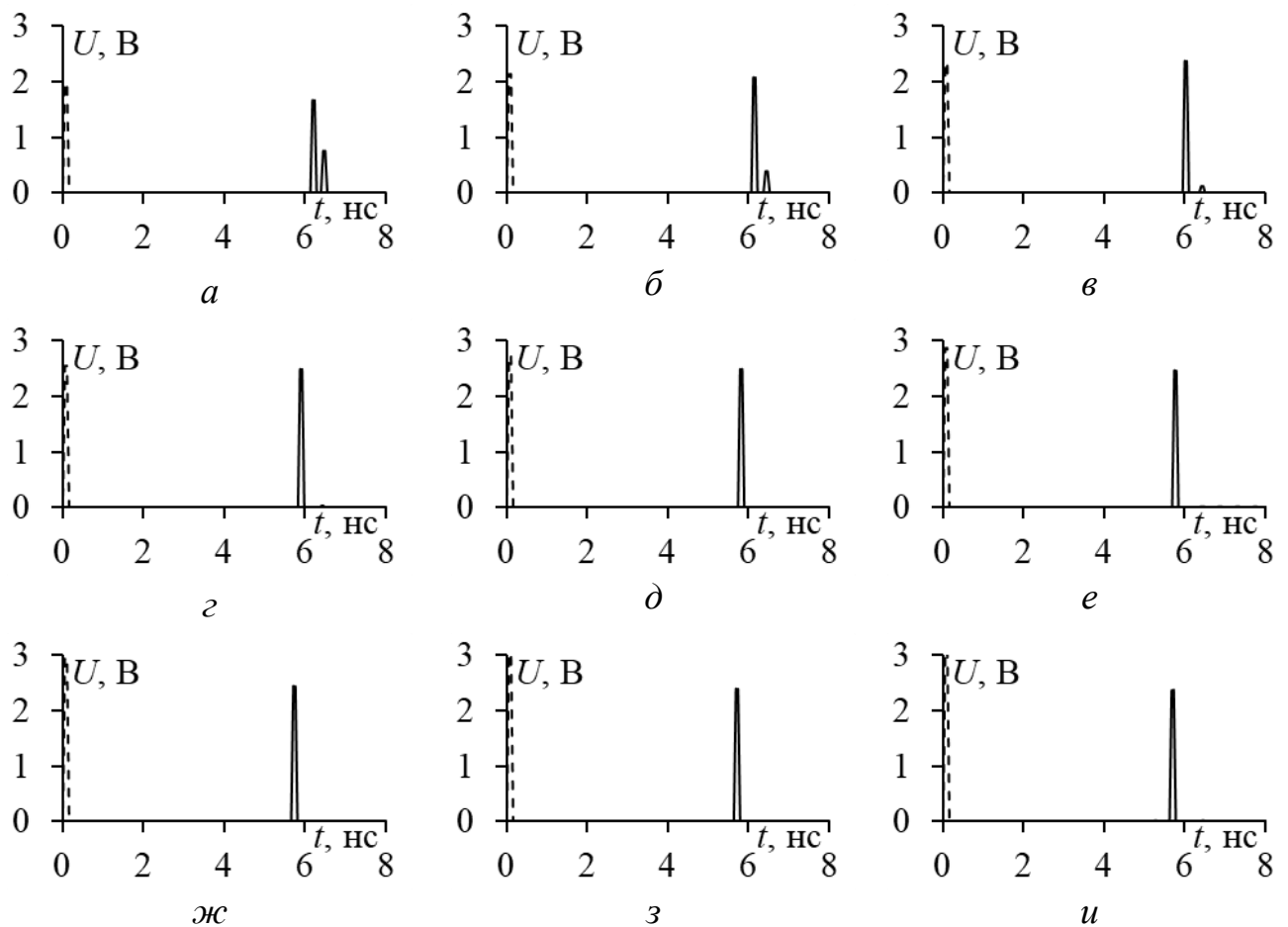


Рисунок 3.92 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з),  $0,9$  (и)  
 для  $h_1=0,9$  мм

В таблице 3.27 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,9$  мм. Они малы.

Таблица 3.27 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,9$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	5,2	6,4	7,7	8,2	8,05	7,7	7,5	7,1	7,1
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	4,3	4,7	4,9	5,7	6,4	6,9	7,3	7,6	7,8

На рисунках 3.93 и 3.94 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,8$  мм. Зависимости  $\tau_2$  и  $\tau_3$  пересекаются при  $s=0,2$  мм. Собственные значения  $\tau$  слабо меняются.

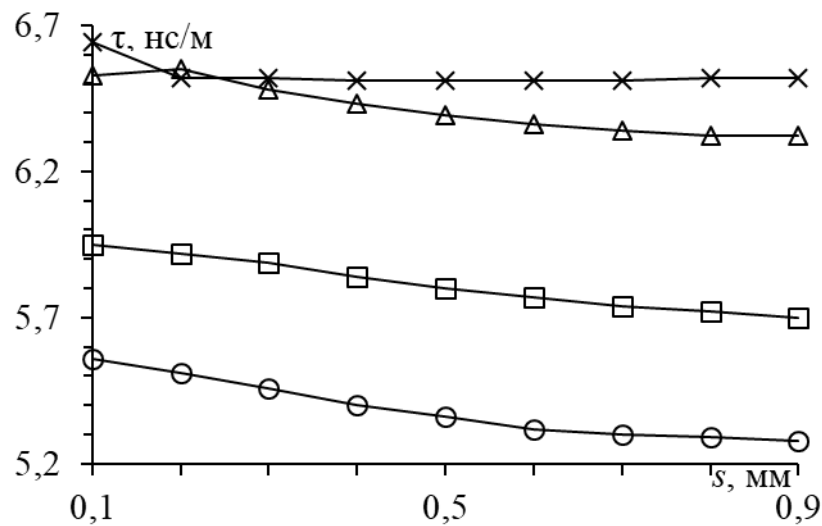


Рисунок 3.93 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,8$  мм

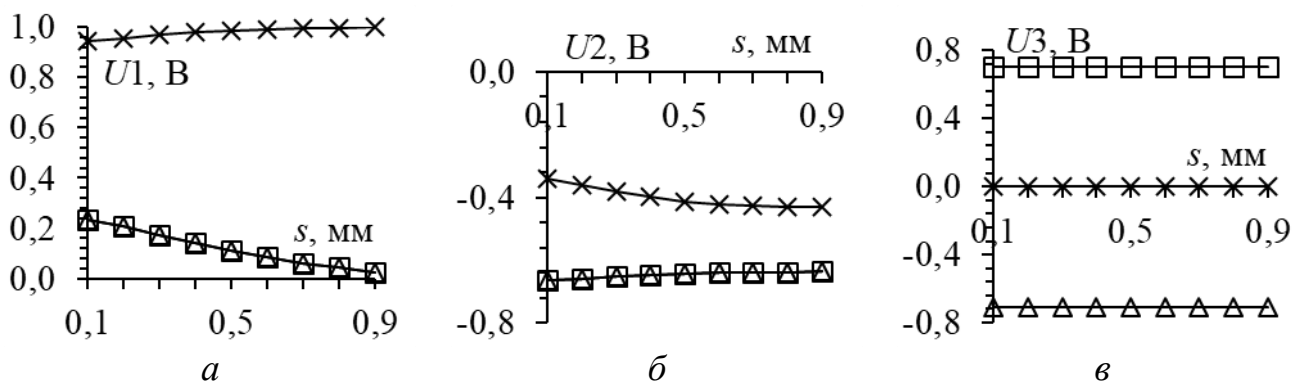


Рисунок 3.94 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,8$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.95 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,8$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно уменьшается с 0,31 В до 0 В, а первого – увеличивается с 2,19 В до 2,35 В.

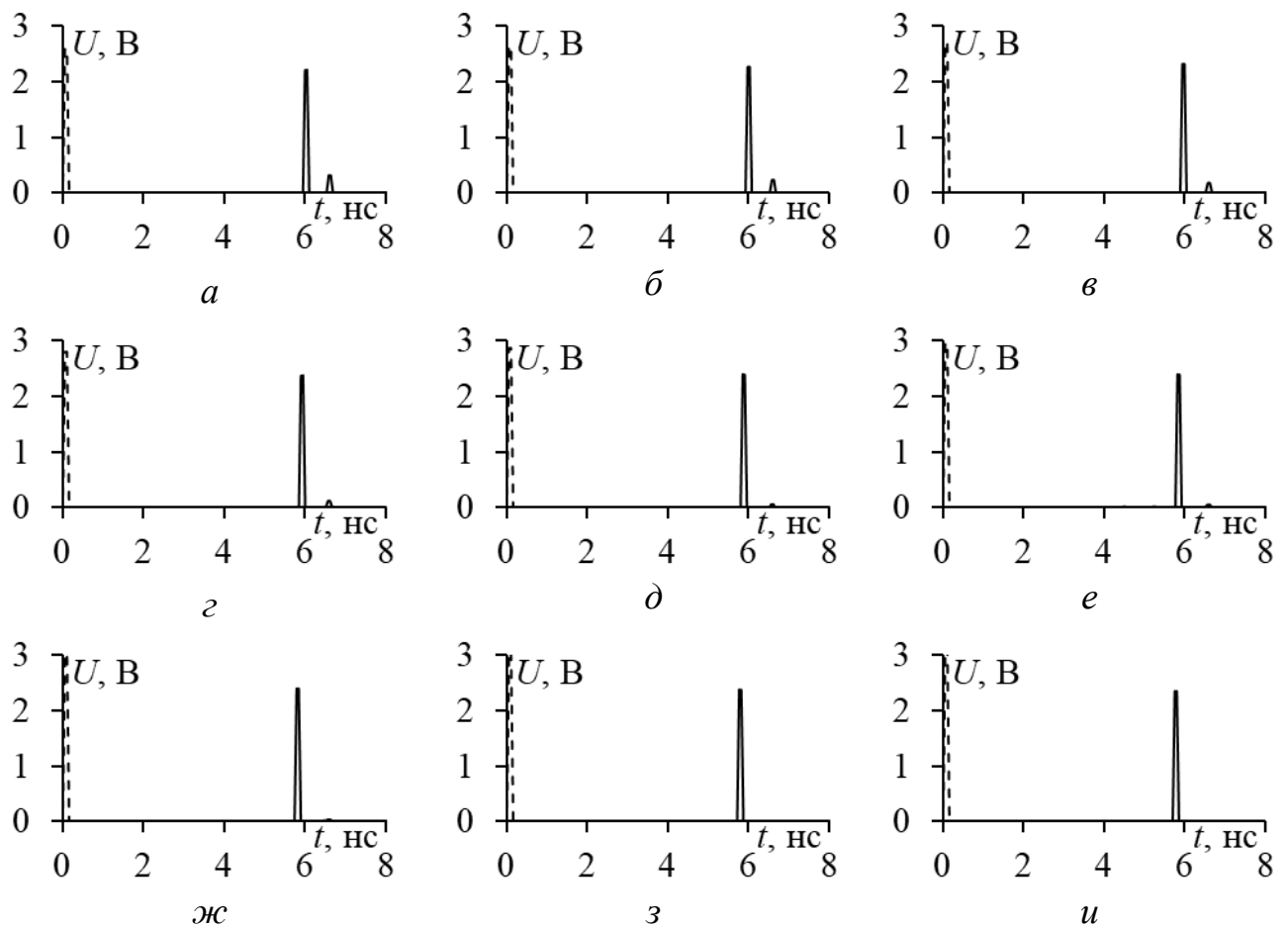


Рисунок 3.95 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и)  
 для  $h_1=0,8$  мм

В таблице 3.28 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,8$  мм. Они растут.

Таблица 3.28 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,8$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	6,9	7,5	7,8	8,2	8,3	8,4	8,3	8	7,9
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	9,86	10,5	10,1	10	10,1	10,3	10,5	10,7	7,9



На рисунках 3.96 и 3.97 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,7$  мм.

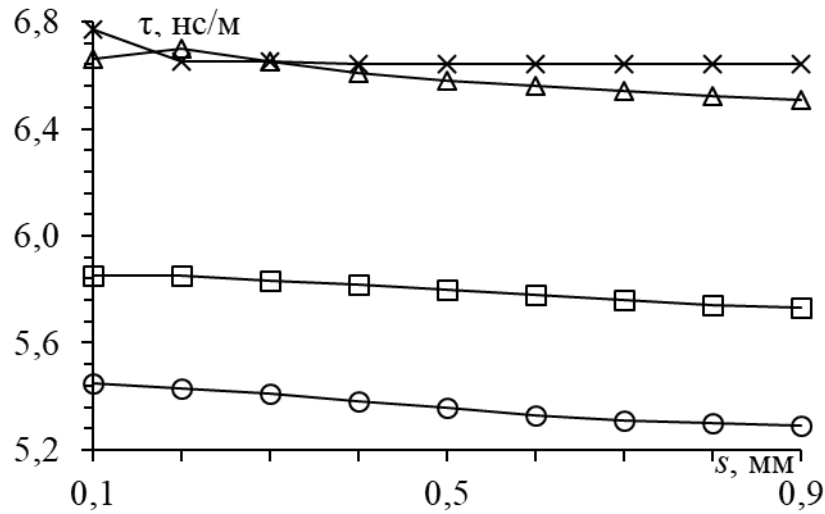


Рисунок 3.96 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,7$  мм

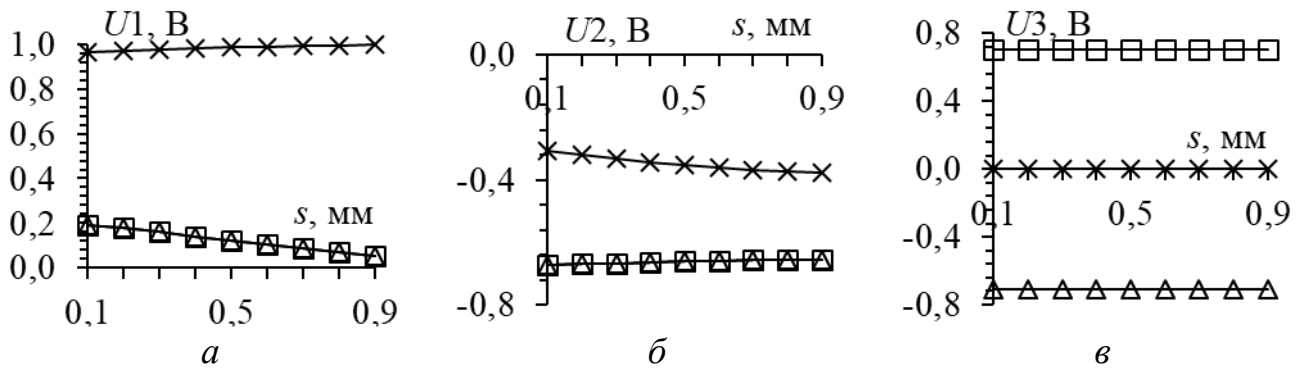


Рисунок 3.97 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,7$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.98 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,7$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса уменьшается с 0,25 В до 0,003 В, а первого – увеличивается с 2,20 В до 2,29 В.

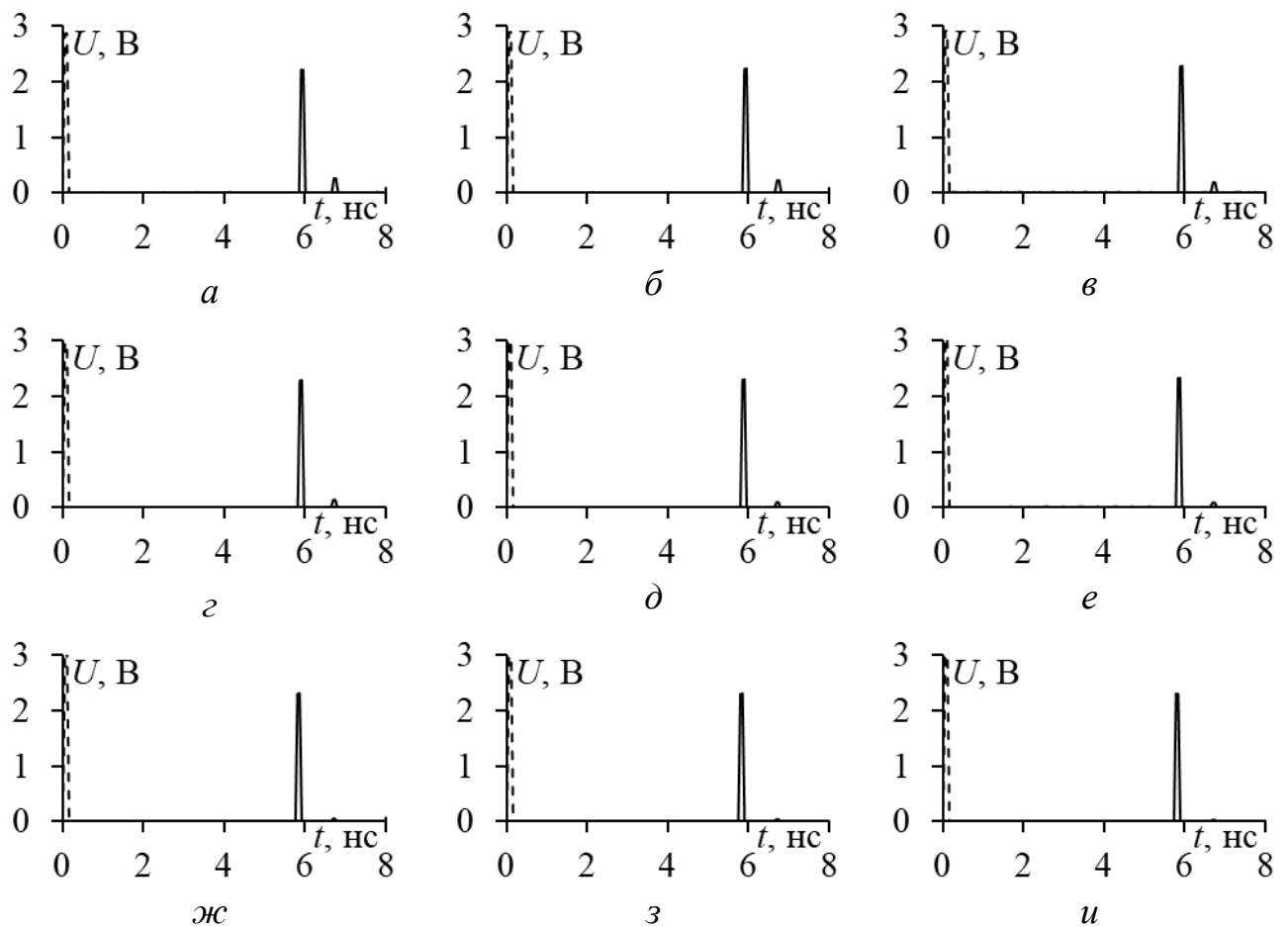


Рисунок 3.98 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h_1=0,7$  мм

В таблице 3.29 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,7$  мм. Их изменения незначительны.

Таблица 3.29 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,7$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,3	7,6	7,8	8,1	8,2	8,4	8,5	8,4	8,3
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	13,8	14,7	14,0	13,4	13,5	13,5	13,46	13,5	13,6

На рисунках 3.99 и 3.100 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,6$  мм.

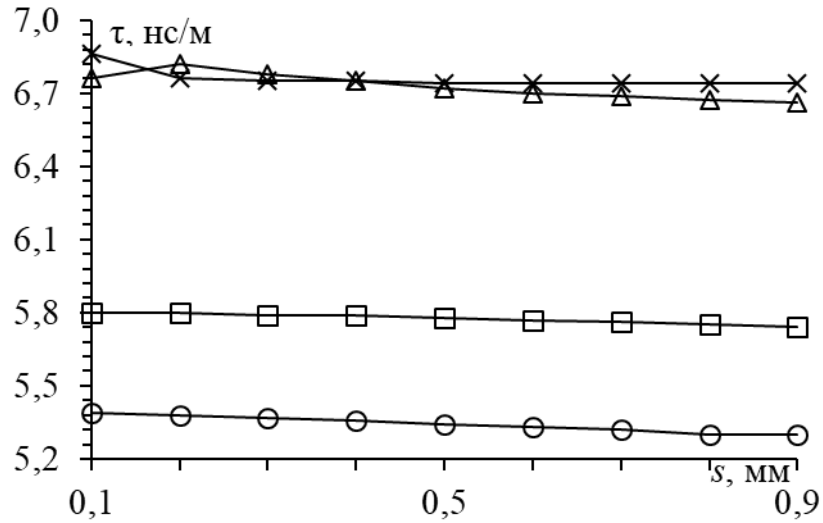


Рисунок 3.99 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,6$  мм

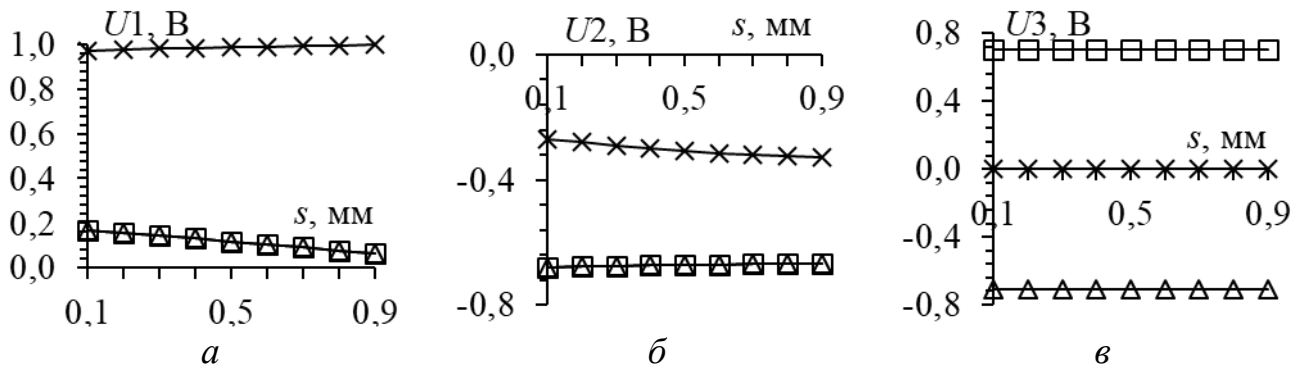


Рисунок 3.100 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,6$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.101 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,6$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса уменьшается с 0,22 В до 0,004 В, а первого – увеличивается с 2,17 В до 2,26 В.

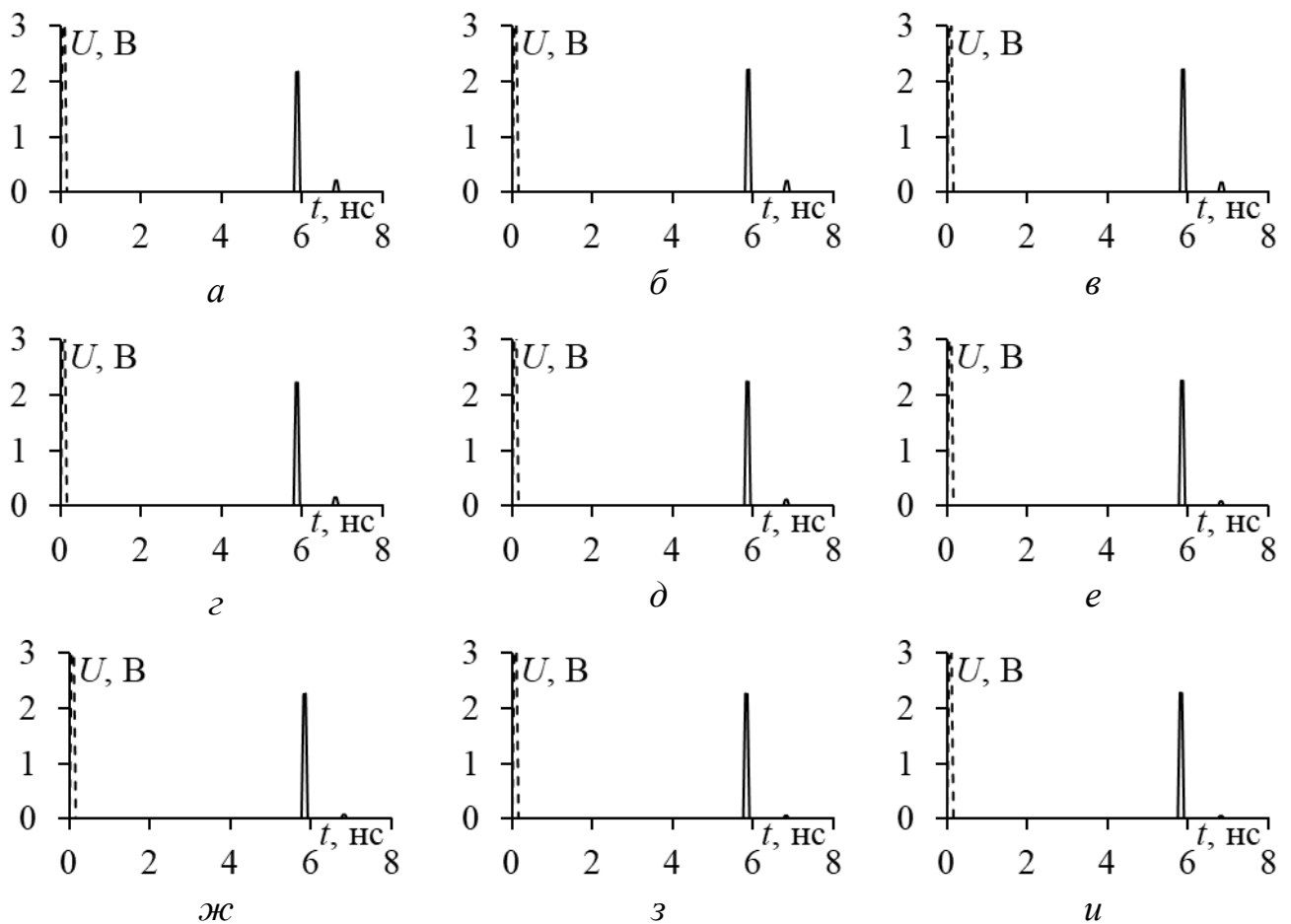


Рисунок 3.101 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)  
 при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и)  
 для  $h_1=0,6$  мм

В таблице 3.30 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,6$  мм. Их изменения незначительны.

Таблица 3.30 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,6$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,3	7,6	7,8	8,1	8,2	8,4	8,5	8,4	8,3
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	25,5	26,7	26,2	25,9	25,9	25,8	25,7	25,9	25,7

На рисунках 3.102 и 3.103 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,5$  мм. Изменения незначительны.

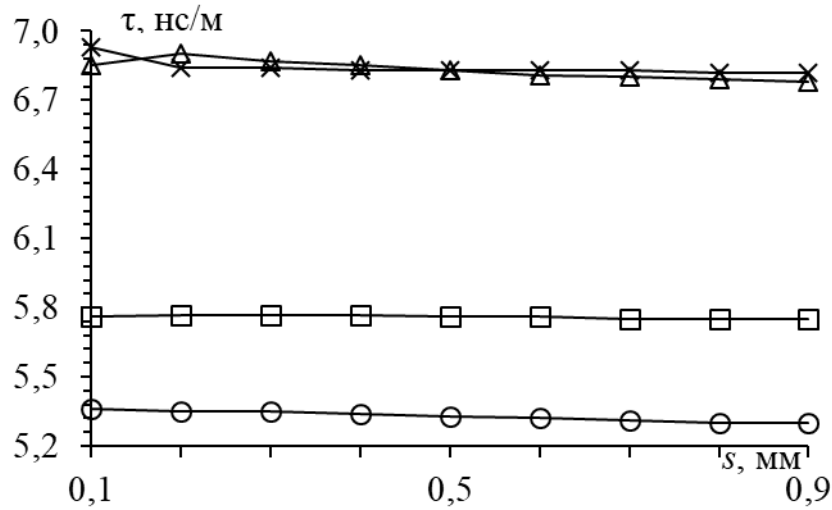


Рисунок 3.102 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,5$  мм

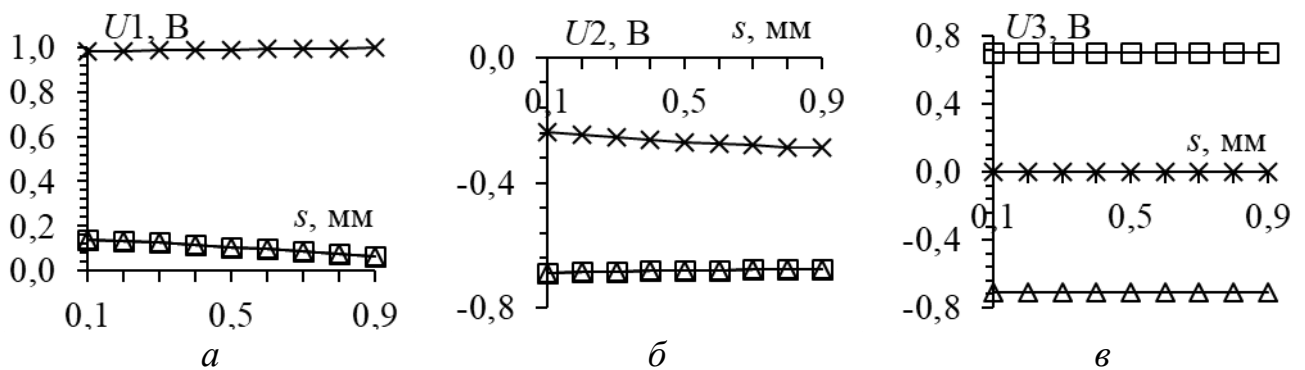


Рисунок 3.103 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,5$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.104 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,5$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно уменьшается с 0,18 В до 0,005 В, а первого – увеличивается с 2,16 В до 2,22 В.

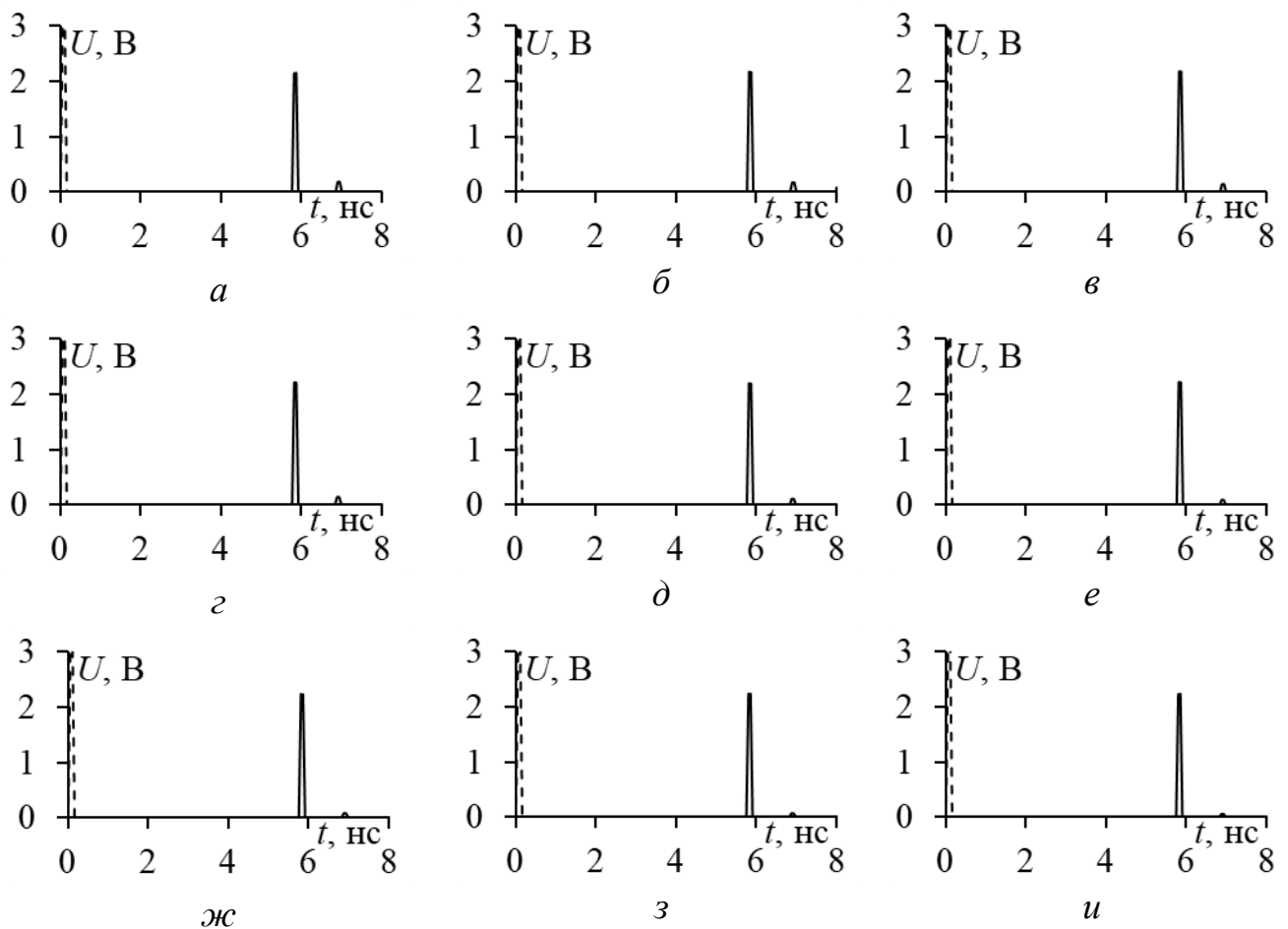


Рисунок 3.104 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,5$  мм

В таблице 3.31 представлены отклонения  $\tau$  для  $h1=0,5$  мм. Их изменения незначительны.

Таблица 3.31 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,5$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	7,5	7,8	7,8	8	8,1	8,3	8,4	8,5	8,4
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	27,8	28,9	28,4	28,3	28,2	28,1	28,1	28,1	27,9

На рисунках 3.105 и 3.106 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,4$  мм. Изменения незначительны.

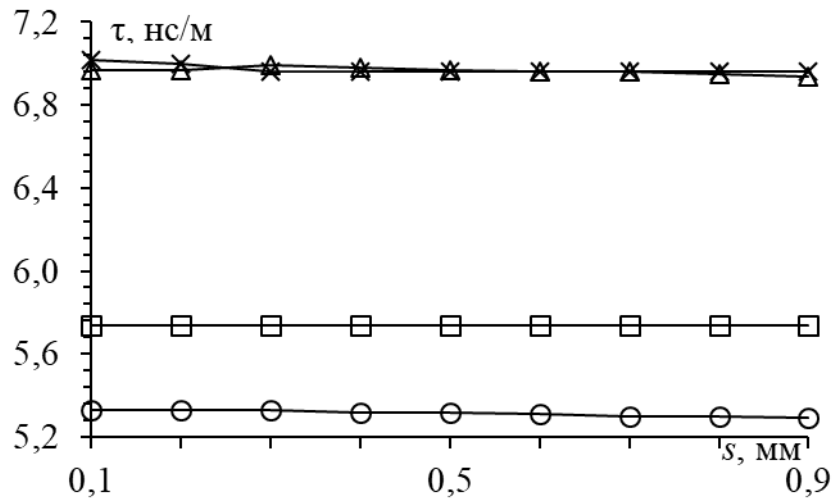


Рисунок 3.105 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (△) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,4$  мм

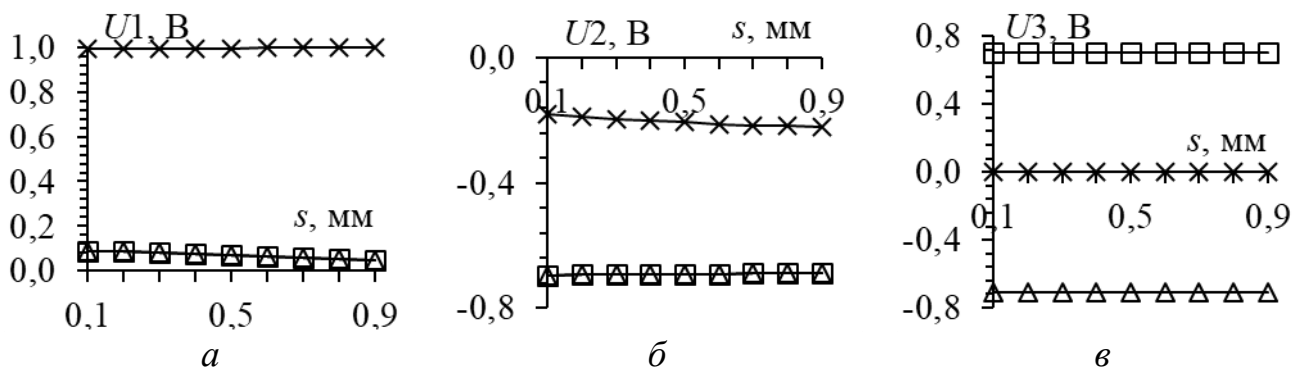


Рисунок 3.106 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,4$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.107 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,4$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно уменьшается с 0,14 В до 0,005 В, а первого – увеличивается с 2,14 В до 2,18 В.

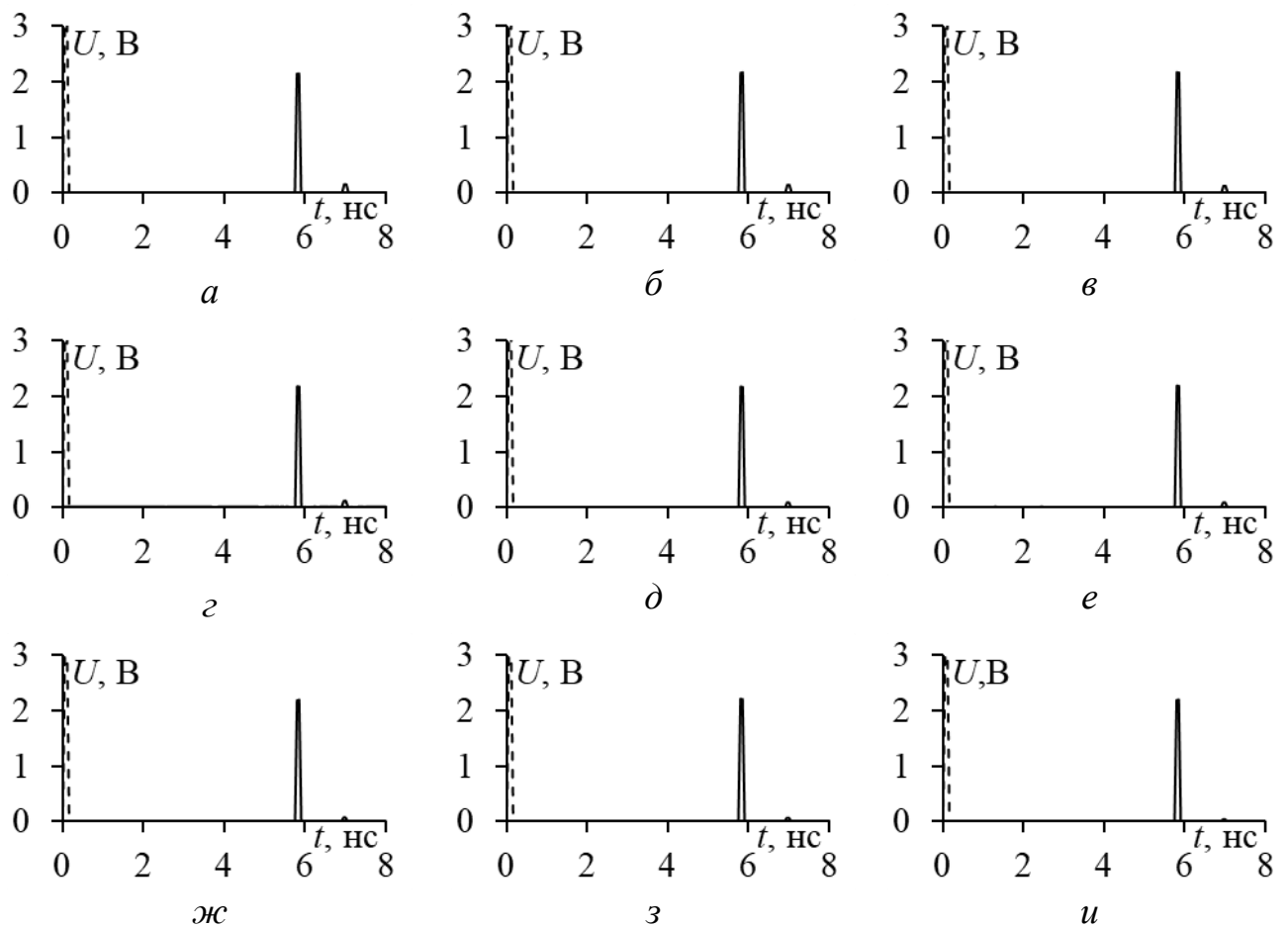


Рисунок 3.107 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—)

при  $s=0,1$  (*a*),  $0,2$  (*б*),  $0,3$  (*в*),  $0,4$  (*г*),  $0,5$  (*д*),  $0,6$  (*е*),  $0,7$  (*ж*),  $0,8$  (*з*) и  $0,9$  (*и*)

для  $h_1=0,4$  мм

В таблице 3.32 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,4$  мм. Их изменения незначительны.

Таблица 3.32 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,4$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0 - \tau_1 /\tau_0) * 100\%$	7,6	7,7	7,71	7,9	7,7	8,2	8,4	8,4	8,6
$( \tau_0 - \tau_2 /\tau_0) * 100\%$	30,7	30,7	31,2	31,2	31	31,1	31,3	31	31,3



На рисунках 3.108 и 3.109 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,3$  мм. Изменения незначительны. Значения  $\tau_2$  и  $\tau_3$  всё больше сближаются.

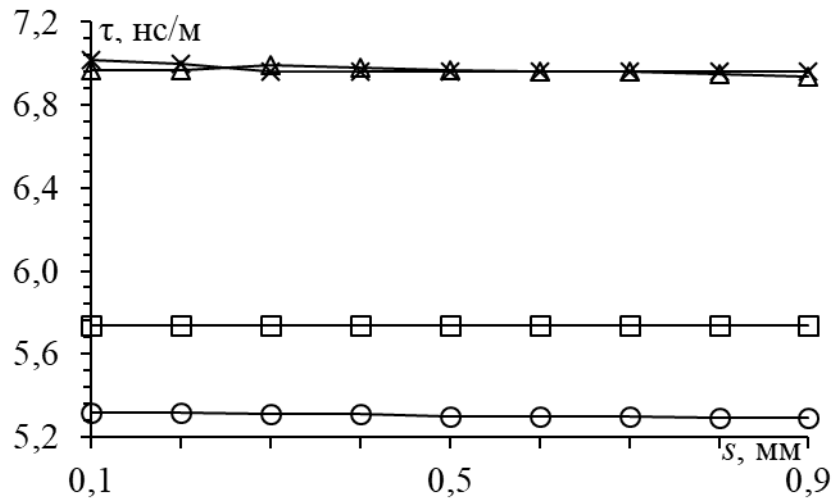


Рисунок 3.108 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,3$  мм

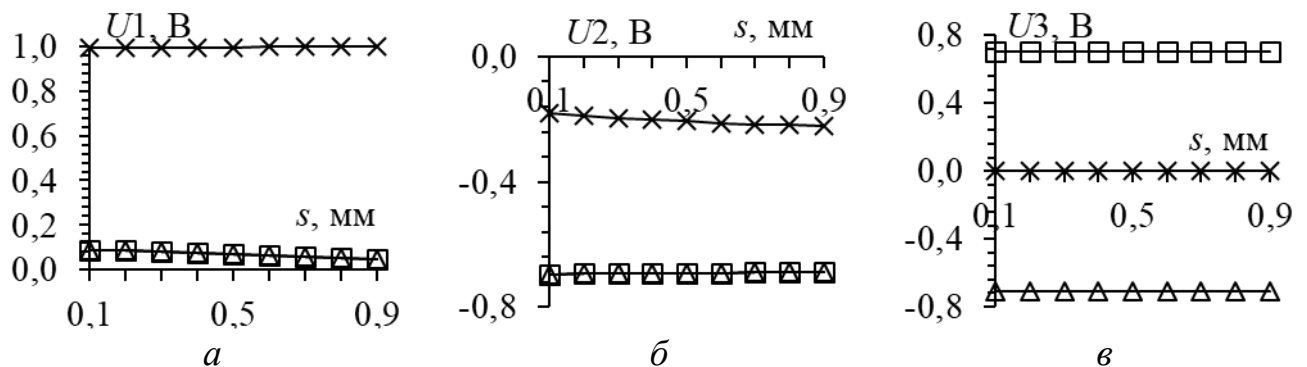


Рисунок 3.109 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,3$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.110 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,3$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно уменьшается с 0,11 В до 0,004 В, а первого – увеличивается с 2,14 В до 2,18 В.

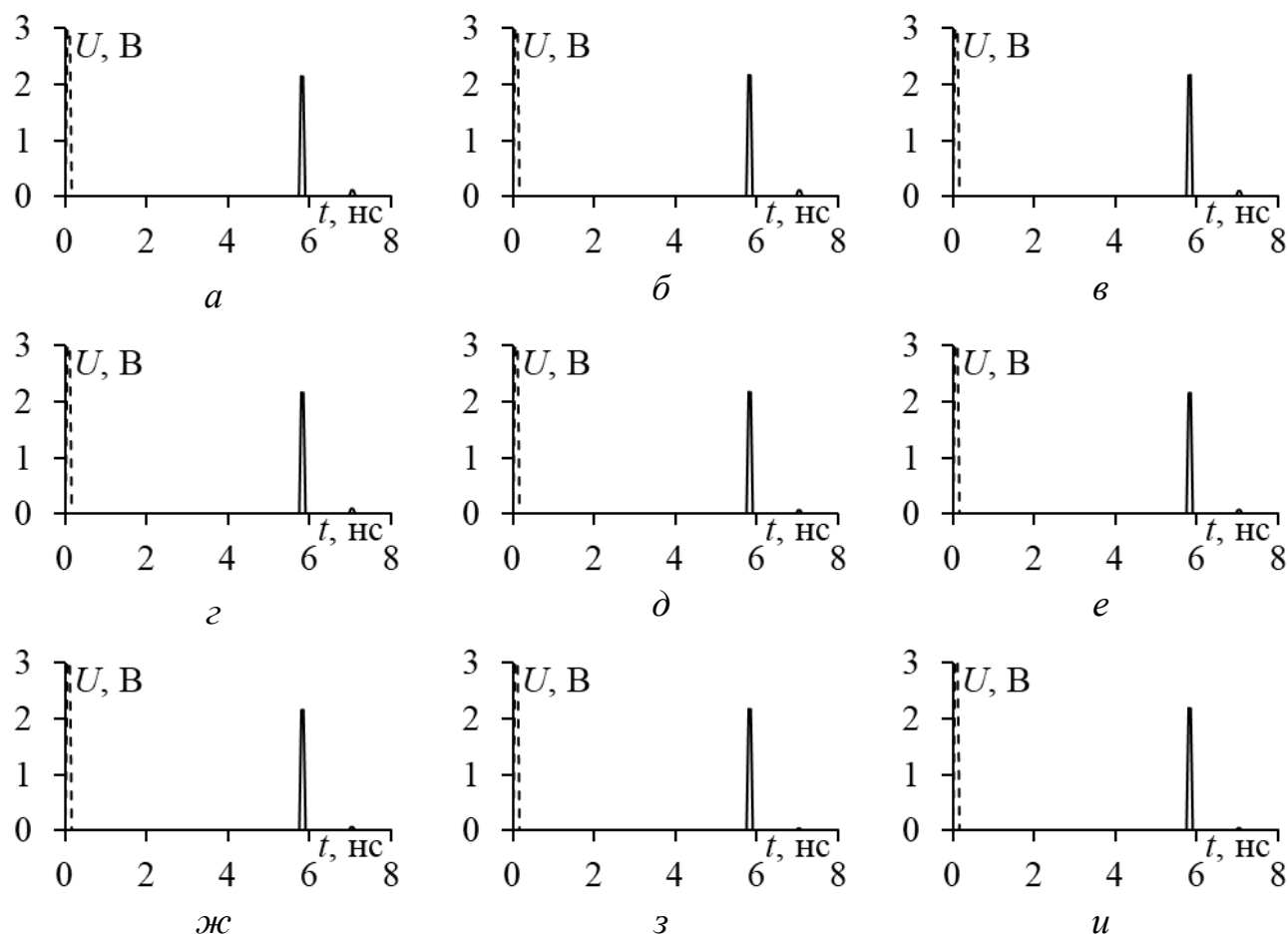


Рисунок 3.110 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (*a*),  $0,2$  (*б*),  $0,3$  (*в*),  $0,4$  (*г*),  $0,5$  (*д*),  $0,6$  (*е*),  $0,7$  (*ж*),  $0,8$  (*з*) и  $0,9$  (*и*) для  $h_1=0,3$  мм

В таблице 3.33 представлены отклонения  $\tau$  для  $h_1=0,3$  мм. Изменения незначительно растут.

Таблица 3.33 – Отклонения  $\tau$  при  $h_1=0,3$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	7,8	7,9	8,1	8,1	8,4	8,4	8,4	8,6	8,6
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	31	31	32	31	32	31	31	32	31

На рисунках 3.111 и 3.112 представлены аналогичные результаты для  $h_1=0,2$  мм. Изменения незначительны.

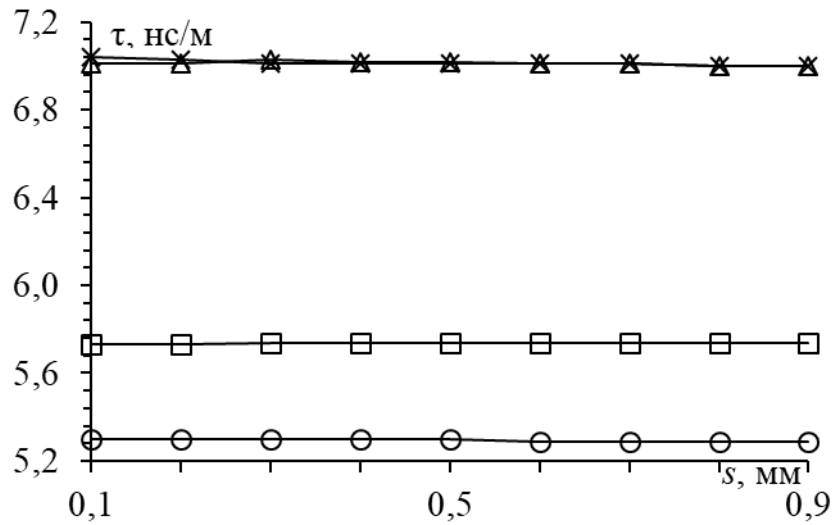


Рисунок 3.111 – Зависимости  $\tau_0$  (○),  $\tau_1$  (□),  $\tau_2$  (Δ) и  $\tau_3$  (×) от  $s$  при  $h_1=0,2$  мм

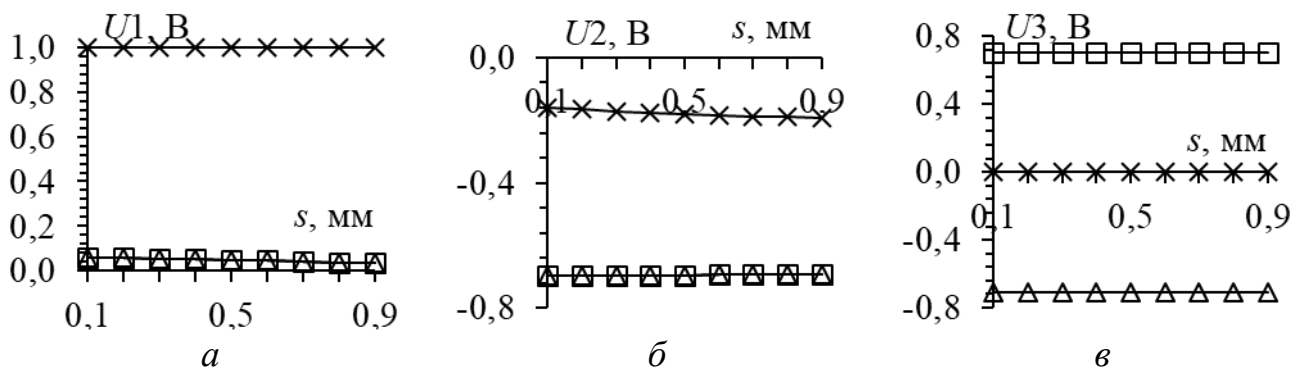


Рисунок 3.112 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,2$  мм для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 3.113 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,2$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно уменьшается с 0,007 В до 0,002 В, а первого – увеличивается с 2,14 В до 2,16 В.

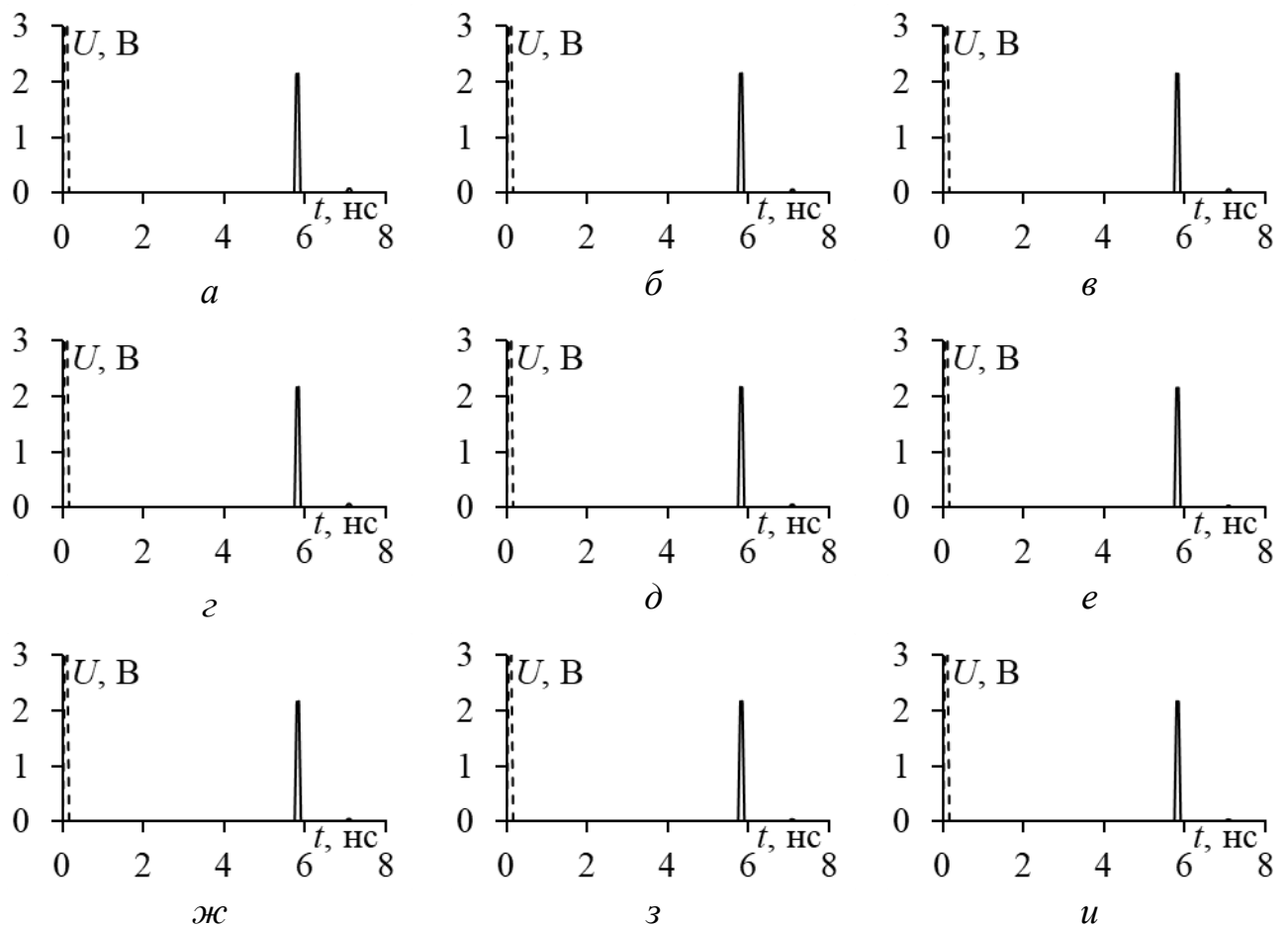


Рисунок 3.113 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,2$  мм

В таблице 3.34 представлены отклонения  $\tau$  для  $h1=0,2$  мм. Изменения незначительны, но растут.

Таблица 3.34 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,2$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	8,1	8,2	8,2	8,3	8,3	8,5	8,5	8,5	8,6
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	32,3	32,7	32,6	32,5	32,4	32,6	32,5	32,4	32,3

На рисунках 3.114 и 3.115 представлены аналогичные результаты для  $h1=0,1$  мм. Изменения незначительны. Значения  $\tau_2$  и  $\tau_3$  сравнивались.

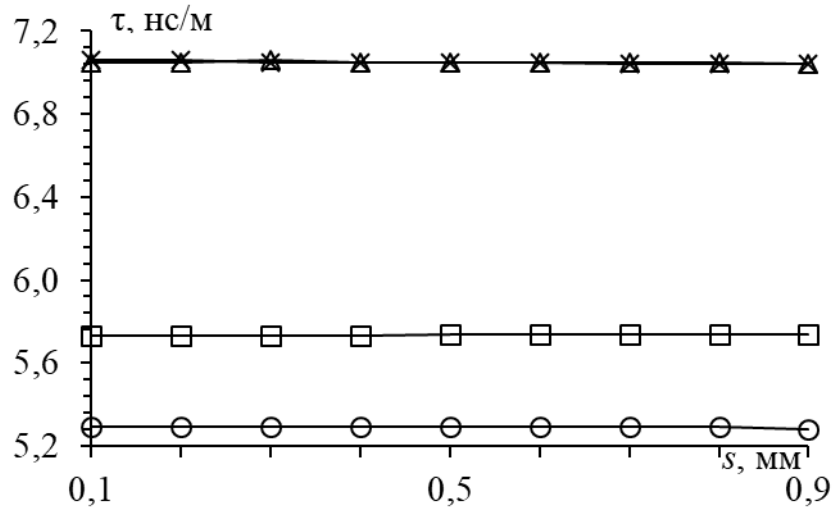


Рисунок 3.114 – Зависимости  $\tau_0$  ( $\circ$ ),  $\tau_1$  ( $\square$ ),  $\tau_2$  ( $\Delta$ ) и  $\tau_3$  ( $\times$ ) от  $s$  при  $h_1=0,1$  мм

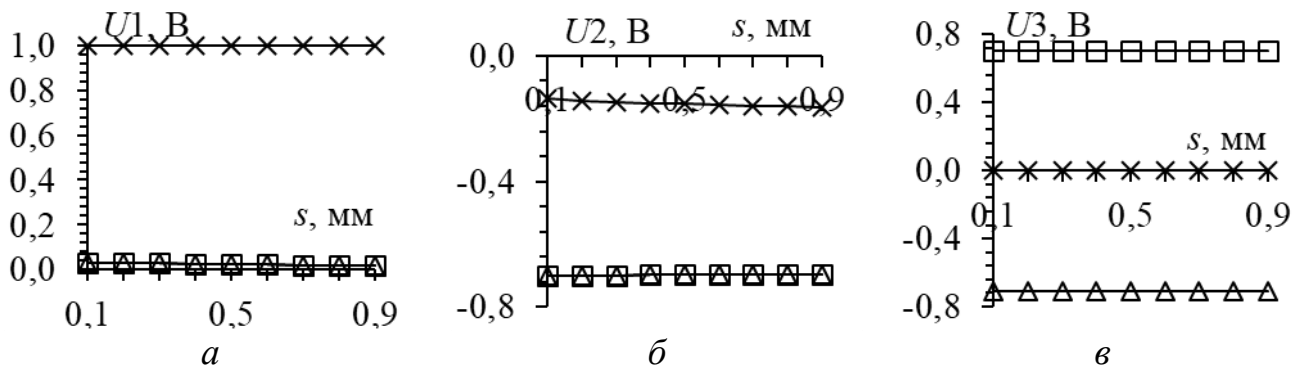


Рисунок 3.115 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $s$  при  $h_1=0,1$  мм для  $\tau_1$  ( $a$ ),  $\tau_2$  ( $б$ ) и  $\tau_3$  ( $в$ )

На рисунке 3.116 представлены временные отклики на воздействие СКИ при  $s=0,1-0,9$  мм для  $h_1=0,2$  мм. С увеличением  $s$  амплитуда второго импульса незначительно уменьшается с 0,007 В до 0,002 В, а первого – увеличивается с 2,14 В до 2,16 В.

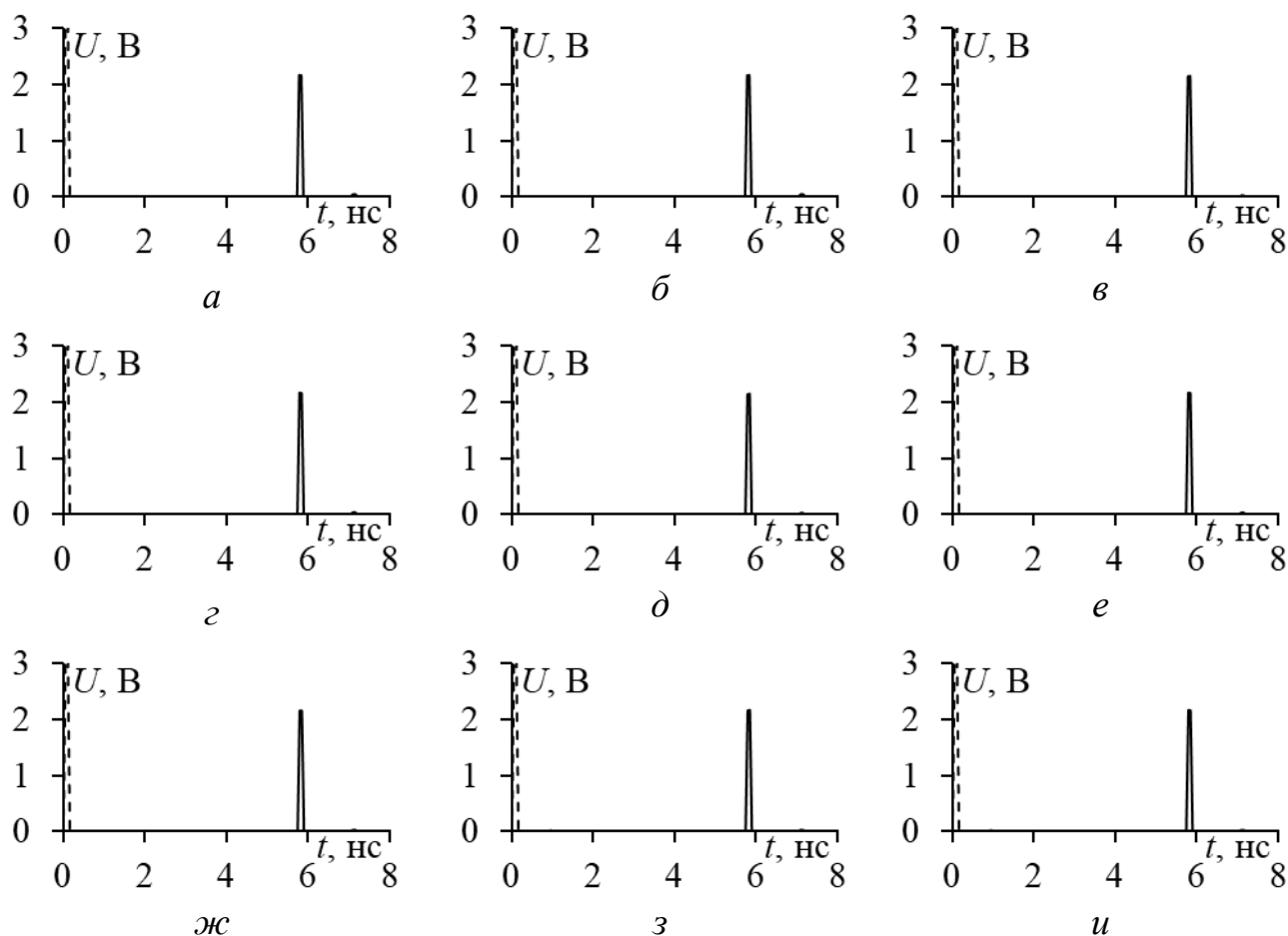


Рисунок 3.116 – Формы напряжения на входе (---) и выходе (—) при  $s=0,1$  (а),  $0,2$  (б),  $0,3$  (в),  $0,4$  (г),  $0,5$  (д),  $0,6$  (е),  $0,7$  (ж),  $0,8$  (з) и  $0,9$  (и) для  $h1=0,1$  мм

В таблице 3.35 представлены отклонения  $\tau$  для  $h1=0,1$  мм. Изменения незначительны, но достигли 33%.

Таблица 3.35 – Отклонения  $\tau$  при  $h1=0,1$  мм

$s$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$( \tau_0-\tau_1 /\tau_0)*100\%$	8,3	8,31	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,8
$( \tau_0-\tau_2 /\tau_0)*100\%$	33,2	33,2	33,4	33,3	33,3	33,2	33,2	33,2	33,4

Таким образом, проведенный анализ МПЛ с проводниками, углубленными в подложку, показал, что с уменьшением  $h1$  и увеличением  $s$  амплитуда второго импульса уменьшается, почти до нуля. Это значит, что использование такой линии в качестве модального фильтра невозможно.

### 3.4 Микророскоковые линии со свойствами защиты от сверхкоротких импульсов

Здесь представлены 3 заявки на патент на изобретение, возможность которых следует из приведенных выше подразделов. Техническим результатом заявляемых устройств является возможность защиты от СКИ, достигаемая за счет его модального разложения. Наиболее близкой к ним и взятой за прототип является обычная МПЛ, состоящая из опорного проводника в виде проводящего слоя, диэлектрической подложки на опорном проводнике и сигнального проводника в виде полоски на подложке [46]. Недостатком линии является то, что она не обеспечивает защиту от СКИ.

#### *Микророскоковая линия с заземленным проводником сверху*

Предлагается МПЛ, состоящая из опорного проводника в виде проводящего слоя, диэлектрической подложки на опорном проводнике и сигнального проводника в виде полоски на подложке, отличающаяся наличием проводника сверху, соединенного на концах с опорным проводником, и выбором длины линии такой, что её произведение на разность погонных задержек мод линии больше длительности СКИ, воздействующего между сигнальным и опорным проводниками, и обеспечивается его разложение на два импульса, а высоты проводника над подложкой и его ширины такими, что обеспечивается равенство амплитуд этих импульсов.

Достижимость технического результата показана на примере моделирования структуры, поперечное сечение которой приведено на рисунке 3.117 а, схема электрическая принципиальная – на рисунке 3.1 а, а воздействующий СКИ – на рисунке 3.1 в. Параметры поперечного сечения  $d=0,85$  мм,  $t=18$  мкм,  $w=0,9$  мм,  $w_1=1$  мм,  $h=1$  мм,  $h_1=0,2$  мм,  $\epsilon_r=4,5$ . Совокупность этих параметров определяет матрицы погонных коэффициентов  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$  индукции линии. Другие параметры схемы: длина линии  $l=1$  м, внутренние сопротивления источника СКИ и нагрузки  $R_1=R_2=50$  Ом. Дополнительный проводник соединен на концах с опорным проводником. У источника СКИ амплитуда ЭДС 5 В, а

времена нарастания, плоской вершины и спада по 50 пс. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

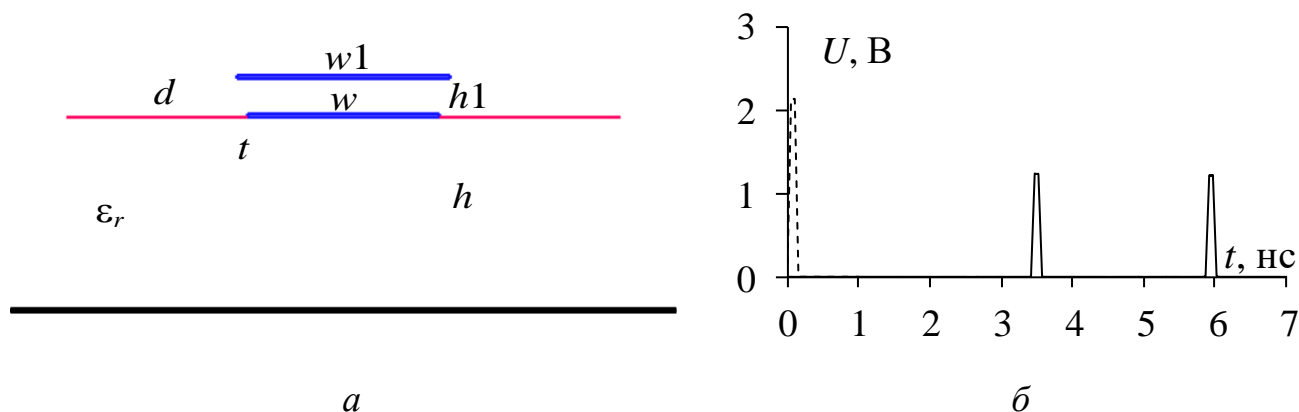


Рисунок 3.117 – Поперечное сечение предлагаемой линии (а) и формы напряжения в её начале (- -) и конце (-) (б)

Вычисленные матрицы  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 427,06 & 344,23 \\ 344,23 & 444,63 \end{bmatrix} \text{нГн/м}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 124,43 & -55,35 \\ -55,35 & 69,96 \end{bmatrix} \text{пФ/м}.$$

Корень квадратный из собственных значений произведения этих матриц определяет значения погонных задержек мод, распространяющихся в такой линии, как  $\tau_1=3,419$  нс/м и  $\tau_2=5,869$  нс/м. Интервал между импульсами (около 2,45 нс) определяется произведением длины линии (1 м) и разности погонных задержек мод 1 и 2 (около 2,45 нс/м). Это подтверждают вычисленные формы напряжения в начале ( $V_2$ ) и конце ( $V_3$ ) сигнального проводника, приведенные на рисунке 3.117 б. Как видно,  $V_3(t)$  представляет собой два импульса с интервалом между ними около 2,45 нс и равными амплитудами около 1,22 В.

*Микрополосковая линия с двумя симметричными проводниками сверху*

Предлагается МПЛ, состоящая из опорного проводника в виде проводящего слоя, диэлектрической подложки на опорном проводнике и сигнального проводника в виде полоски на подложке, отличающаяся наличием двух симметричных проводников сверху, соединенных на концах с опорным проводником, и выбором длины линии такой, что её произведение на разность третьей и второй погонных задержек мод линии больше длительности СКИ,



воздействующего между сигнальным и опорным проводниками, и обеспечивается его разложение на два импульса, а высоты проводников над подложкой, их ширины и расстояния между ними такими, что обеспечивается равенство амплитуд этих импульсов.

Достижимость технического результата показана на примере моделирования структуры, поперечное сечение которой приведено на рисунке 3.118 а, схема электрическая принципиальная – на рисунке 3.1 б, а воздействующий СКИ – на рисунке 3.1 в. Параметры поперечного сечения  $t=18$  мкм,  $w=0,3$  мм,  $w1=1$  мм,  $h=1$  мм,  $h1=0,1$  мм,  $s=0,45$  мм,  $\epsilon_r=4,5$ . Два симметричных проводника соединены на концах с опорным проводником. Параметры СКИ такие же. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

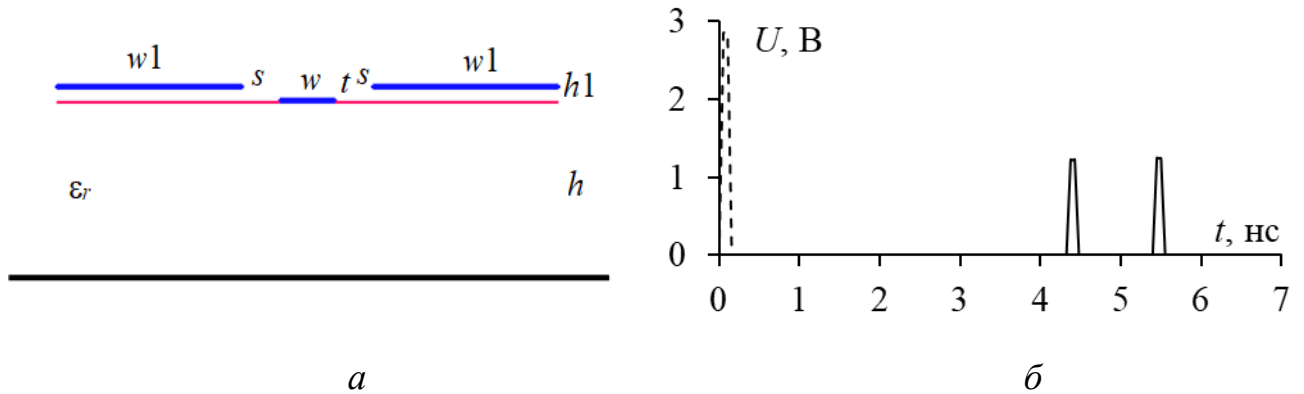


Рисунок 3.118 – Поперечное сечение предлагаемой линии (а) и формы напряжения в её начале (- -) и конце (-) (б)

Вычисленные матрицы  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 518,1 & 235,8 & 235,8 \\ 235,8 & 412,7 & 147,8 \\ 235,8 & 147,7 & 412,7 \end{bmatrix} \text{ нГн/м}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 72,82 & -22,06 & -22,06 \\ -22,06 & 60,61 & -5,68 \\ -22,06 & -5,68 & 60,61 \end{bmatrix} \text{ пФ/м}.$$

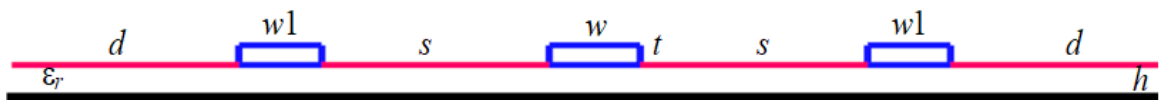
Значения погонных задержек мод, распространяющихся в такой линии:  $\tau_1=4,19$  нс/м,  $\tau_2=4,323$  нс/м,  $\tau_3=5,388$  нс/м. Однако в силу симметрии двух верхних проводников амплитуда импульса моды 1 равна нулю, и остаются только импульсы мод 2 и 3. Интервал между ними (около 1 нс) определяется произведением длины линии (1 м) и разности погонных задержек мод 2 и 3 (около 1 нс/м). Это подтверждают вычисленные формы напряжения в начале (V2) и

конце ( $V_3$ ) сигнального проводника, приведенные на рисунке 3.118. Как видно,  $V_3(t)$  представляет собой два импульса с интервалом между ними около 1 нс и равными амплитудами около 1,2 В, а амплитуда  $V_2(t)$  составляет около 2,9 В.

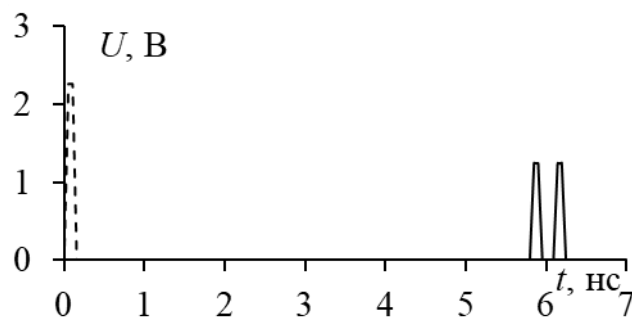
*Микрополосковая линия с двумя боковыми заземленными проводниками*

Предлагается МПЛ, состоящая из опорного проводника в виде проводящего слоя, диэлектрической подложки на опорном проводнике и сигнального проводника в виде полоски на подложке, отличающаяся наличием двух боковых симметричных проводников на подложке, соединенных на концах с опорным проводником, и выбором длины линии такой, что её произведение на разность третьей и второй погонных задержек мод линии больше длительности СКИ, воздействующего между сигнальным и опорным проводниками, и обеспечивается его разложение на два импульса, а расстояния между проводниками и их ширины такими, что обеспечивается равенство амплитуд этих импульсов.

Достижимость технического результата показана на примере моделирования структуры, поперечное сечение которой приведено на рисунке 3.119 с параметрами  $h=0,18$  мм,  $d=1$  мм,  $s=0,9$  мм,  $\epsilon_r=4,5$ . Два симметричных проводника соединены на концах с опорным проводником. Параметры СКИ такие же. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.



*a*



*б*

Рисунок 3.119 – Поперечное сечение предлагаемой линии (*a*)

и формы напряжения в её начале (- -) и конце (-) (*б*)

Вычисленные матрицы **L** и **C**:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 256,6 & 11,35 & 2,777 \\ 11,35 & 245,2 & 11,35 \\ 2,777 & 11,35 & 256,6 \end{bmatrix} \text{ нГн/м}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 136,4 & -1,423 & 0,277 \\ -1,423 & 14,45 & -1,423 \\ -0,277 & -1,423 & 136,4 \end{bmatrix} \text{ пФ/м}.$$

Значения погонных задержек мод, распространяющихся в такой линии:  $\tau_1=5,889$  нс/м,  $\tau_2=5,796$  нс/м  $\tau_3=6,089$  нс/м. Однако в силу симметрии двух боковых проводников амплитуда импульса моды 1 равна нулю, и остаются только импульсы мод 2 и 3. Интервал между ними (0,293 нс) определяется произведением длины линии (1 м) и разности погонных задержек мод 2 и 3 (0,293 нс/м). Это подтверждают вычисленные формы напряжения в начале ( $V_2$ ) и конце ( $V_3$ ) сигнального проводника, приведенные на рисунке 3.119. Как видно,  $V_3(t)$  представляет собой два импульса с интервалом между ними около 0,3 нс и равными амплитудами около 1,23 В, а амплитуда  $V_2(t)$  составляет около 2,26 В.

В заключение отметим важные отличия новых МФ. Минимальные и равные напряжения импульсов на выходе известных МФ, как правило, получались при сопротивлениях на концах пассивного проводника, значения которых равны среднему геометрическому волновых сопротивлений мод, а в некоторых МФ – при коротком замыкании на одном конце и холостом ходе на другом. Но в новых МФ равное напряжение импульсов получается при коротком замыкании пассивного проводника на обоих концах опорного. Многие известные МФ [47] имеют симметричное (или близкое к нему) расположение активного и пассивного проводников относительно опорного, которое обеспечивало равенство амплитуд напряжения импульсов. Но в новых МФ это обеспечивается при резко асимметричном расположении этих проводников относительно опорного. При этом, в случае одного проводника сверху, обеспечивается весьма высокая разность погонных задержек, что позволяет защиту от СКИ большой длительности или уменьшение длины МФ. Между тем МФ с двумя боковыми проводниками на диэлектрике проще изготовить.

### 3.5 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 воздействующего импульса на два импульса затруднено, особенно при углублении проводников.

4. Три указанные выше МПЛ обладают защитными свойствами, представляя собой 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:

1. Ввод параметров.
2. Создание геометрической модели поперечного сечения.
3. Вычисление матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ .
4. Вычисление погонной задержки и волнового сопротивления в предположении полного заземления дополнительных проводников.
5. Вычисление произведения матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$  и его собственных значений и векторов.
6. Построение временных откликов на воздействие СКИ в предположении заземления дополнительных проводников только на концах.
7. Вычисление отклонения задержек мод в %.

## 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

### 4.1 Оценка влияния температуры на характеристики и параметры модифицированных микрополосковых линий

#### 4.1.1 Микрополосковая линия

Здесь, в качестве предварительного исследования, выполнено квазистатическое моделирование в системе TALGAT обычной МПЛ [48–50] по температурной модели, представленной в пункте 1.2.5. В качестве исходных выбраны следующие значения параметров поперечного сечения МПЛ:  $w=1000$  мкм,  $t=18$  мкм,  $h=500$  мкм,  $d=3w$ ,  $\epsilon_r=5,6$ .

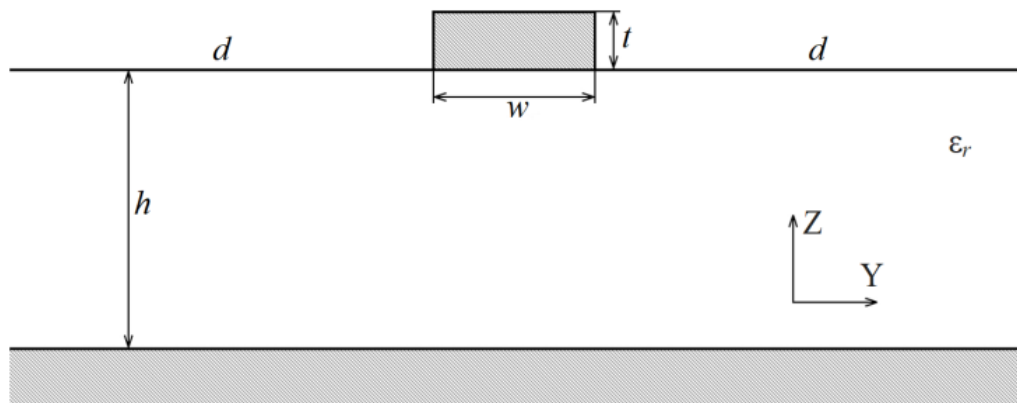


Рисунок 4.1 – Поперечное сечение МПЛ

Диапазон изменения температуры принят от  $-50$  до  $150$  °С, с шагом  $25$  °С. Разница температур вычислялась от  $25$  °С. Значение  $\alpha$  для меди принято равным  $17 \cdot 10^{-6}$  м/К в соответствии с [51], а для диэлектрической основы платы по осям  $Z$  и  $Y$  –  $70 \cdot 10^{-6}$  м/К и  $17 \cdot 10^{-6}$  м/К [52] соответственно.

На рисунке 4.2 приведены зависимости  $\epsilon_r$  от  $T$  при изменении частоты и материала на основе слоя стеклоткани и эпоксидной смолы (glass fiber and resin) из статьи [27], из которых следует, что  $\alpha_0 = -0,003$  К $^{-1}$ . Тогда, разделив  $\alpha_0$  на

среднее по частоте значение  $\epsilon_r=5,6$  при  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ , получим  $\alpha=-5,35\cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ .  
 Последующее моделирование выполнено на примере этого диэлектрика.

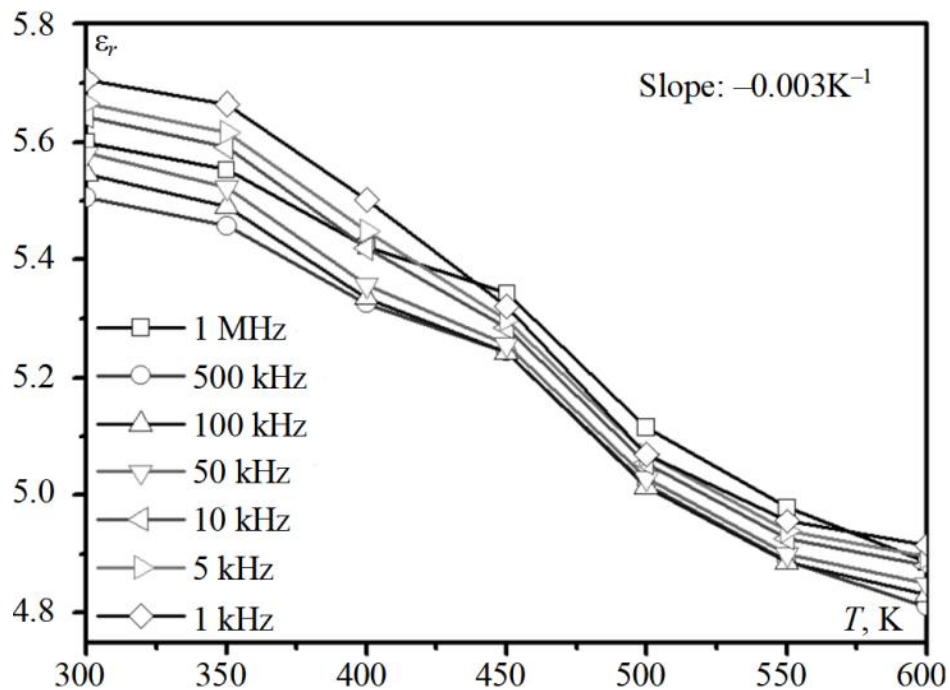


Рисунок 4.2 – Зависимость  $\epsilon_r(T)$  для разных частот [27]

Для наглядности в таблице 4.1 сведены вычисленные значения  $w$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $d$  и  $\epsilon_r$  в диапазоне температур.

Таблица 4.1 – Зависимости параметров поперечного сечения линии от  $T$

$T, ^\circ\text{C}$	$w$ , мкм	$t$ , мкм	$h$ , мкм	$d$ , мкм	$\epsilon_r$
-50	998,73	17,977	497,38	2996,17	5,82
-25	999,15	17,98	498,25	2997,45	5,75
0	999,58	17,99	499,13	2998,72	5,67
25	1000	18	500	3000	5,6
50	1000,42	18,01	500,88	3001,27	5,53
75	1000,85	18,02	501,75	3002,55	5,45
100	1001,28	18,023	502,63	3003,82	5,38
125	1001,7	18,03	503,5	3005,1	5,30
150	1002,13	18,0382	504,375	3006,38	5,23

Вычислены погонные емкости линии с диэлектриком ( $C$ ) и в воздухе ( $C_0$ ) с учетом влияния температуры по выражению (1.2), а также  $\tau$  и  $Z$ . На рисунке 4.3



приведены полученные зависимости от  $T$ , учитывающие изменения каждого из параметров поперечного сечения ( $w$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $d$  и  $\varepsilon_r$ ) по отдельности и одновременно. Из зависимостей для каждого из параметров в отдельности, видно, что влияние на  $t$  и  $d$  практически не приводит к изменению  $C$ ,  $C_0$ ,  $\tau$  и  $Z$ , а влияние на  $w$  ведет к их незначительному изменению. Так, максимальное процентное отношение модуля разности к меньшему значению составило для  $C(T)$  0,22%,  $C_0(T)$  – 0,18%,  $\tau(T)$  – 0,010%,  $Z(T)$  – 0,13%. Большее влияние на погонные параметры оказывает изменение  $h$ . Это вызвано тем, что коэффициент линейного термического расширения для подложки по оси  $Z$  имеет в 4 раза большее значение. Так, вследствие влияния температуры только на  $h$ , максимальное изменение  $C(T)$  составило уже 0,93%,  $C_0(T)$  – 0,79%,  $\tau(T)$  – 0,06%,  $Z(T)$  – 0,87%. Наконец, наибольшее влияние на погонные параметры, причем с обратным знаком, оказывает изменение  $\varepsilon_r$ . Очевидно, что это обусловлено большим и отрицательным значением  $\alpha$  и его существенным влиянием на погонную емкость структуры. Так, вследствие влияния температуры только на  $\varepsilon_r$ , максимальные изменения  $C(T)$ ,  $\tau(T)$  и  $Z(T)$  составили 10,30%, 5,022% и 5,02% соответственно. Примечательно, что полученные зависимости имеют разный наклон. Так, из представленных результатов видно, что влияние температуры на  $w$  и  $h$  по-разному влияет на поведение  $C(T)$ ,  $C_0(T)$ ,  $\tau(T)$  и  $Z(T)$ . Однако эти зависимости при одновременном влиянии  $T$  на все параметры поперечного сечения имеют максимальный наклон, который в большей степени определяется влиянием  $\varepsilon_r$ . Так, при одновременном влиянии  $T$  на все параметры поперечного сечения, максимальное изменение  $C(T)$  составило уже 11,07%,  $C_0(T)$  – 0,69%,  $\tau(T)$  – 5,08% а  $Z(T)$  – 5,71%. Примечателен одинаковый характер зависимостей  $C(T)$ ,  $C_0(T)$ ,  $\tau(T)$  и противоположный –  $Z(T)$ .

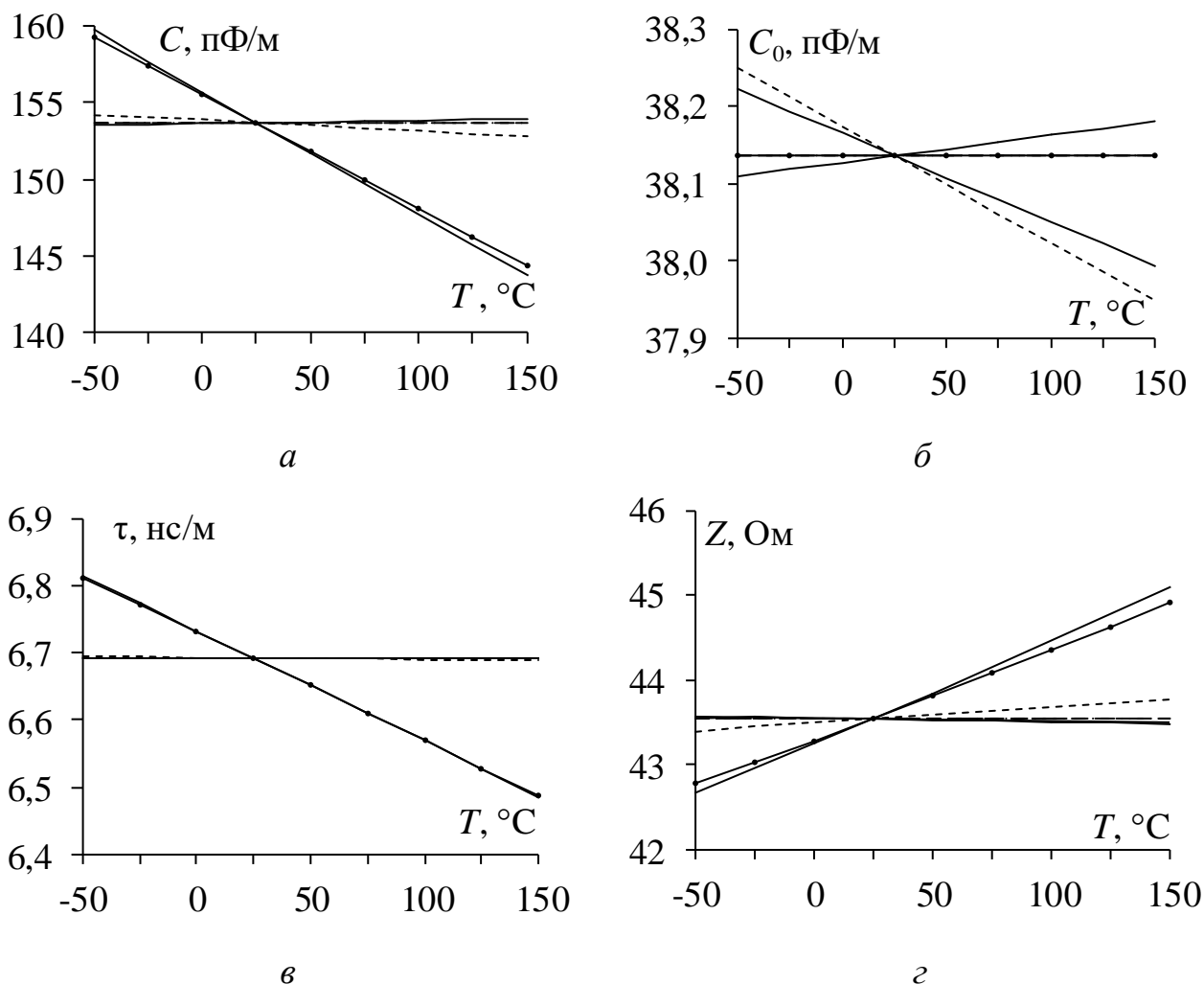


Рисунок 4.3 – Зависимости  $C(T)$  и  $C_0(T)$ ,  $\tau(T)$  и  $Z(T)$  (а–г) при влиянии температуры на  $w$  (—),  $t$  (---),  $h$  (- -),  $d$  (-·-) и  $\epsilon_r$  (-·-·) по отдельности и одновременно (—)

Таким образом, влияние  $T$  отдельно на  $w$ ,  $t$ ,  $h$  и  $d$  в довольно широком диапазоне незначительно изменяет параметры исследуемой линии, при этом максимальное изменение  $C$ ,  $C_0$ ,  $\tau$  и  $Z$  не превышает 1% при изменении  $T$  в диапазоне от  $-50$  до  $150^{\circ}\text{C}$ . Однако влияние  $T$  отдельно на  $\epsilon_r$  значительно, а максимальное изменение  $C$ ,  $\tau$  и  $Z$  составляет уже 10%. При одновременном влиянии  $T$  на изменение всех параметров структуры изменение погонных параметров еще больше и составляет 11,07%.

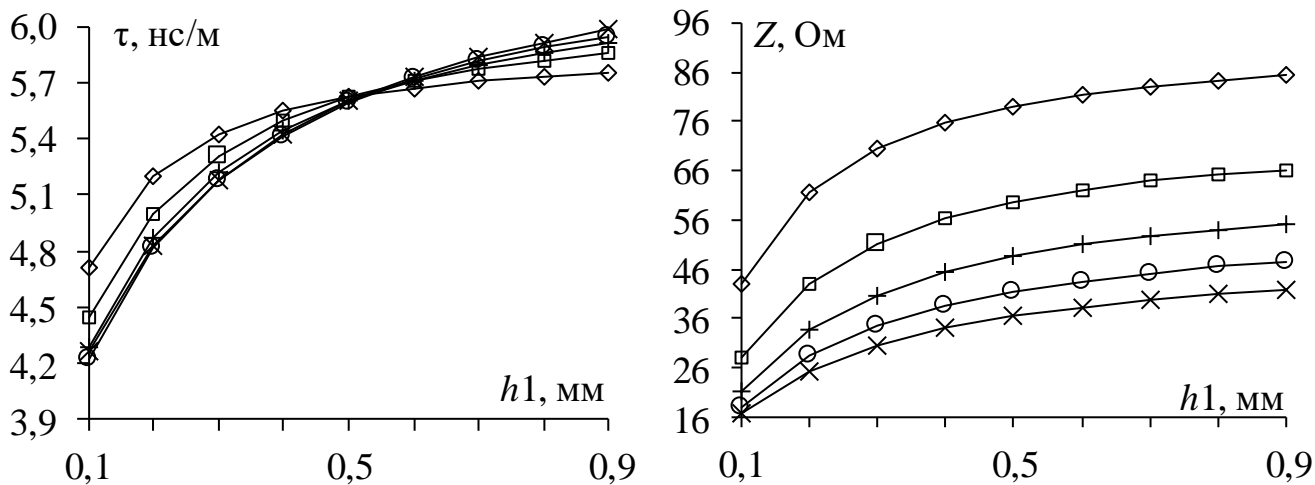
Таким образом, представлена математическая температурная модель и выполнена ее апробация на примере одиночной МПЛ. Выявлено, что влияние температуры, на каждый из параметров поперечного сечения линии отдельно и

одновременно на все, оказывает значительное влияние на погонные емкости и вторичные параметры исследуемой линии. Их максимальное изменение при отдельном влиянии изменения температуры в диапазоне от  $-50$  до  $150^{\circ}\text{C}$  на каждый из параметров поперечного сечения линии составляет 10%, а при совместном – 11,07%. Это влияние в большей степени определяется влиянием температуры на изменение  $\epsilon_r$ .

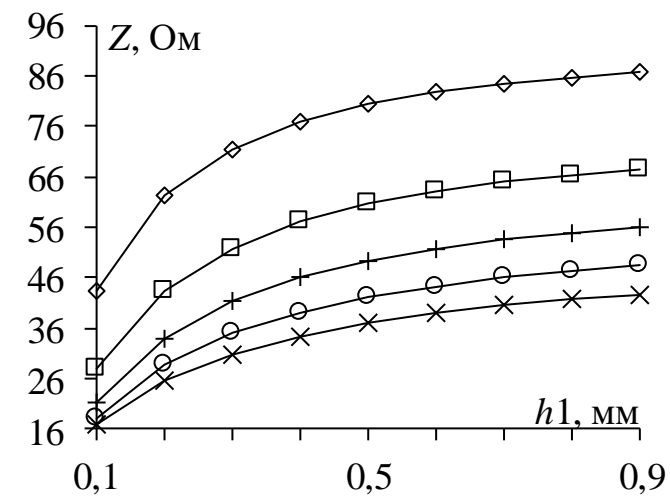
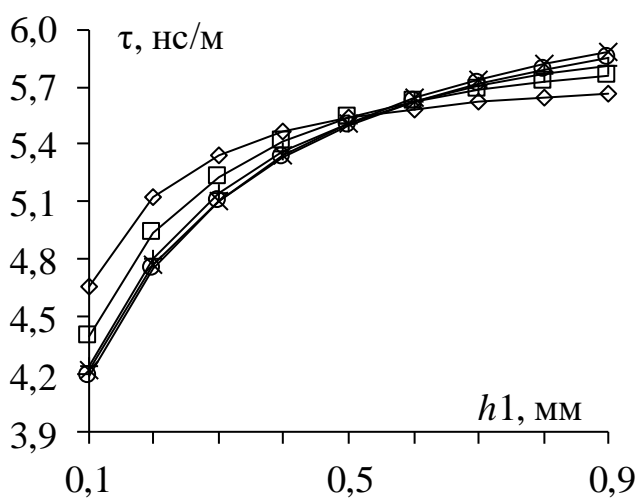
Для реальных материалов коэффициенты линейного термического расширения и изменения относительной диэлектрической проницаемости от температуры могут отличаться от используемых в представленной модели, что окажет влияние на погонную емкость и вторичные параметры устройств на основе МПЛ. Кроме того, рассмотрен лишь один набор значений параметров. Между тем чувствительность различных характеристик к изменению различных параметров меняется при изменении их значений. Но с помощью аналогичного моделирования возможен учет этого.

#### **4.1.2 Микрополосковая линия, покрытая заземленным проводником**

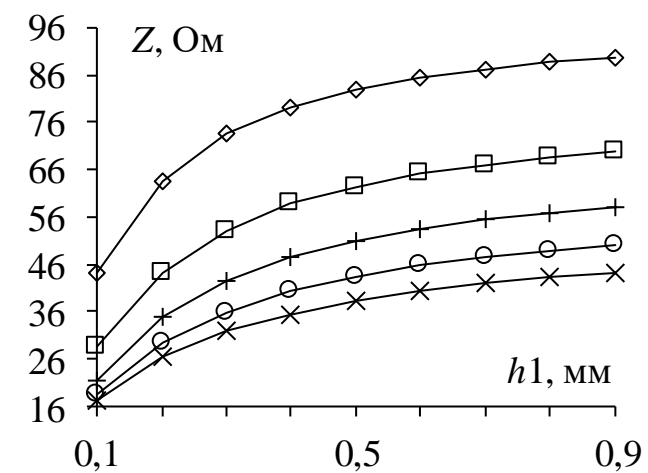
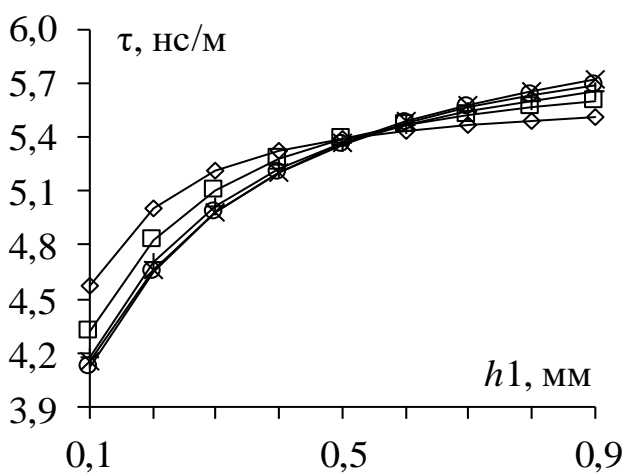
Здесь представлены оценки влияния температуры на характеристики МПЛ, покрытой заземленным проводником, поперечное сечение которой представлено на рисунке 2.1 *a*. Выполнено моделирование при изменении  $T$  от  $-50$  до  $150^{\circ}\text{C}$  шагом  $25^{\circ}\text{C}$ . Однако для наглядного отображения влияния температуры выбраны крайние значения  $T$  ( $-50$  и  $150^{\circ}\text{C}$ ) и комнатная  $T=25^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 4.4 представлены зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $h1$  для  $w=0,3, 0,6, 0,9, 1,2$  и  $1,5$  мм при  $T= -50, 25$  и  $150^{\circ}\text{C}$  с учетом параметров, указанных в подразделе 2.1, и  $\epsilon_r=5,6$ .



a



б



в

Рисунок 4.4 – Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $h1$  при  $T = -50$  (а), 25 (б) и 150 (в) °Cдля  $w = 0,3$  ( $\diamond$ ), 0,6 ( $\square$ ), 0,9 (+), 1,2 ( $\circ$ ) и 1,5 ( $\times$ ) мм

Видно, что при всех  $T$  и для всех указанных  $w$  зависимости  $\tau$  пересекаются в точке  $h1=0,55$  мм. С увеличением  $T$   $\tau$  уменьшаются. Зависимости  $Z$  при всех  $T$  монотонно возрастают.

Влияние  $T$  на характеристики линии можно оценить процентным отношением модуля отклонения характеристики к меньшему значению из таблиц 4.2 и 4.3 видно, что с увеличением  $h1$  отклонение мало, но слабо возрастает. Также независимо от  $T$  в середине диапазона (при  $h1=0,5-0,8$  мм) будет минимальная (вплоть до нулевой) чувствительность  $\tau$  к изменению  $w$ .

Таблица 4.2 – Относительный модуль (%) отклонений  $\tau$

$w$ , мм	$h1$ , мм $T$ , °C	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		0,3	–50	1,16	1,41	1,50	1,54	1,56	1,57	1,58
	150	2,00	2,44	2,60	2,68	2,72	2,75	2,76	2,77	2,78
0,6	–50	1,03	1,34	1,47	1,54	1,58	1,60	1,61	1,62	1,63
	150	1,76	2,32	2,56	2,68	2,75	2,79	2,82	2,83	2,85
0,9	–50	0,95	1,30	1,46	1,53	1,58	1,61	1,63	1,64	1,65
	150	1,63	2,25	2,52	2,67	2,75	2,81	2,85	2,87	2,89
1,2	–50	0,95	1,30	1,45	1,54	1,59	1,62	1,64	1,66	1,67
	150	1,61	2,23	2,51	2,67	2,76	2,83	2,87	2,90	2,92
1,5	–50	0,98	1,31	1,46	1,54	1,60	1,63	1,65	1,67	1,68
	150	1,67	2,26	2,53	2,68	2,78	2,85	2,89	2,92	2,95

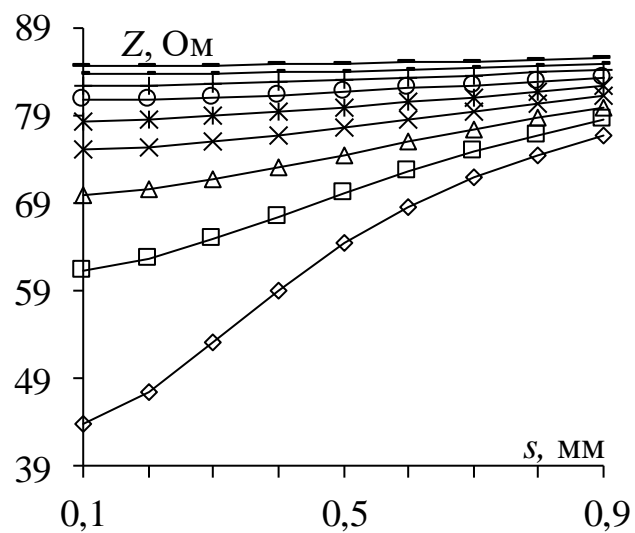
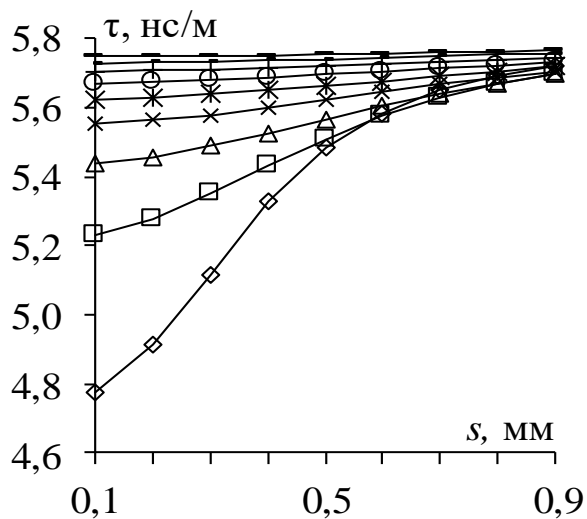
Таблица 4.3 – Относительный модуль (%) отклонений  $Z$ 

$w$ , мм	$h1$ , мм $T$ , °C	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	0,3	-50	0,95	1,30	1,49	1,60	1,68	1,74	1,78	1,82
150		1,63	2,25	2,58	2,79	2,94	3,04	3,12	3,18	3,23
0,6	-50	0,85	1,25	1,45	1,58	1,67	1,74	1,79	1,82	1,85
	150	1,45	2,15	2,52	2,75	2,91	3,03	3,12	3,19	3,24
0,9	-50	0,81	1,24	1,45	1,59	1,68	1,74	1,79	1,83	1,87
	150	1,37	2,13	2,51	2,75	2,92	3,04	3,13	3,20	3,26
1,2	-50	0,85	1,27	1,47	1,60	1,69	1,76	1,81	1,85	1,88
	150	1,44	2,18	2,55	2,78	2,94	3,06	3,15	3,22	3,28
1,5	-50	0,92	1,32	1,51	1,63	1,71	1,77	1,82	1,86	1,89
	150	1,57	2,27	2,62	2,83	2,98	3,09	3,18	3,25	3,30

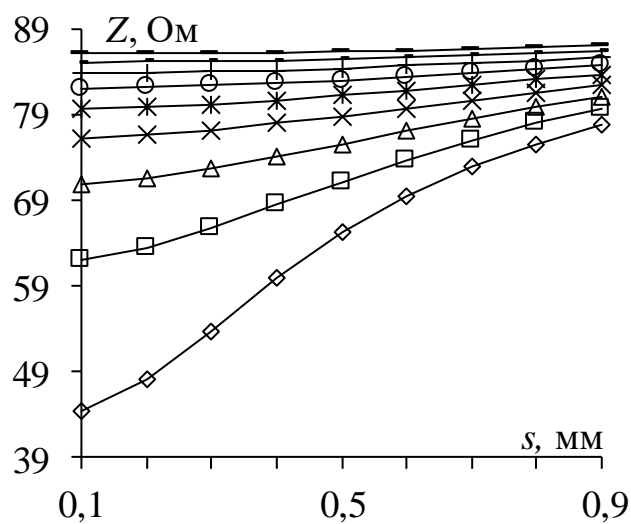
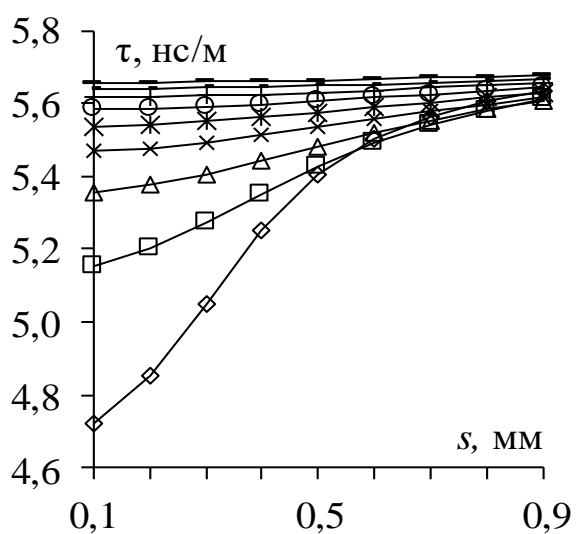
### 4.1.3 Микрополосковая линия

#### с двумя боковыми заземленными проводниками

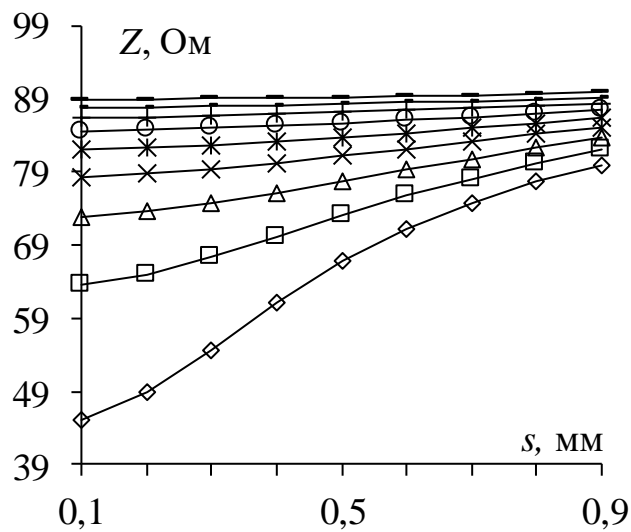
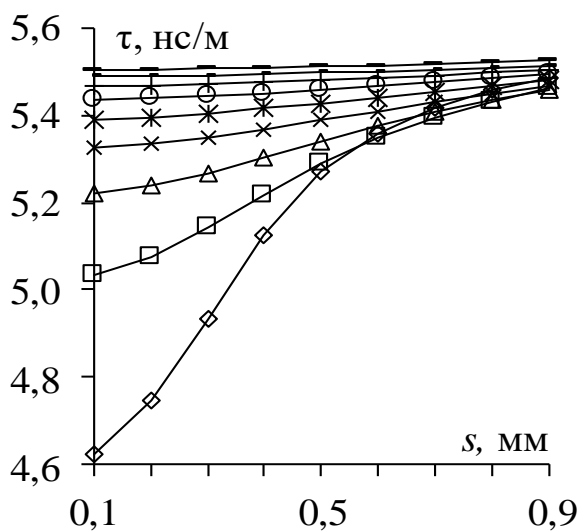
Оценено влияние температуры на характеристики МПЛ с боковыми заземленными проводниками сверху поперечное сечение, которой представлено на рисунке 2.2 а [53]. Выполнено моделирование чувствительности характеристик  $\tau$  и  $Z$  при  $T = -50, 25$  и  $150$  °C и  $s = 0,1-0,9$  мм для  $h1 = 0,1-0,9$  мм с параметрами из раздела 2.1 и  $\epsilon_r = 5,6$ . (рисунок 4.5). Как видно по рисунку 4.5, поведение зависимостей остаётся одинаковым при всех  $T$ . С увеличением  $T$   $\tau$  уменьшается, а  $Z$  увеличивается. Оценка влияния  $T$  приведена в таблицах 4.4 и 4.5. Видно, что с увеличением  $s$  и  $h1$  отклонения возрастают.



a



б



в

Рисунок 4.5 – Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $s$  при  $T = -50$  (а),  $25$  (б) и  $150$  (в)  $^\circ\text{C}$  для  $h_1 = 0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,4$  ( $\times$ ),  $0,5$  ( $\text{ж}$ ),  $0,6$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $+$ ),  $0,8$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $-$ ) мм

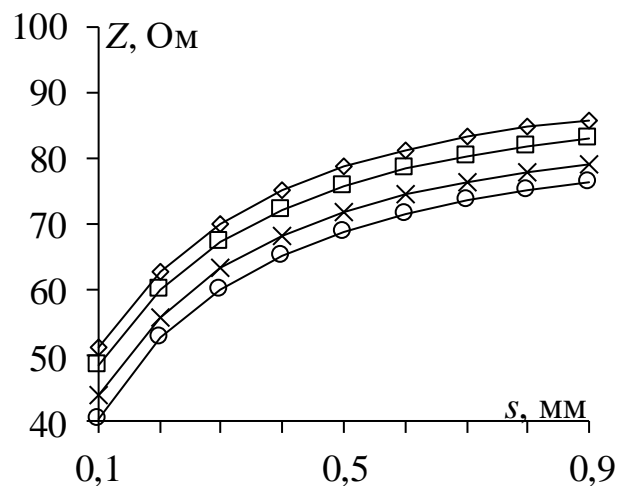
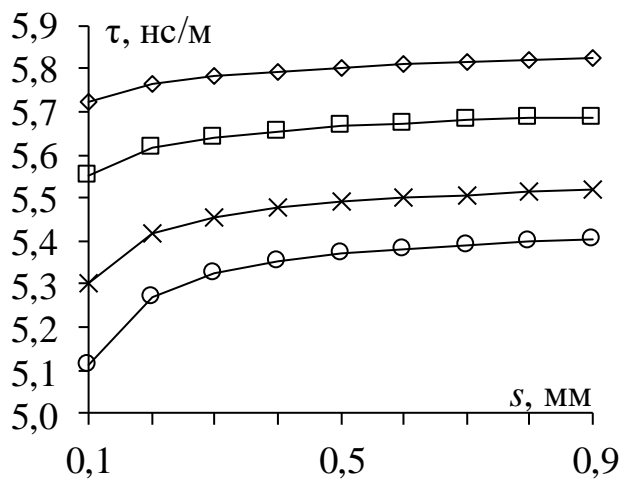




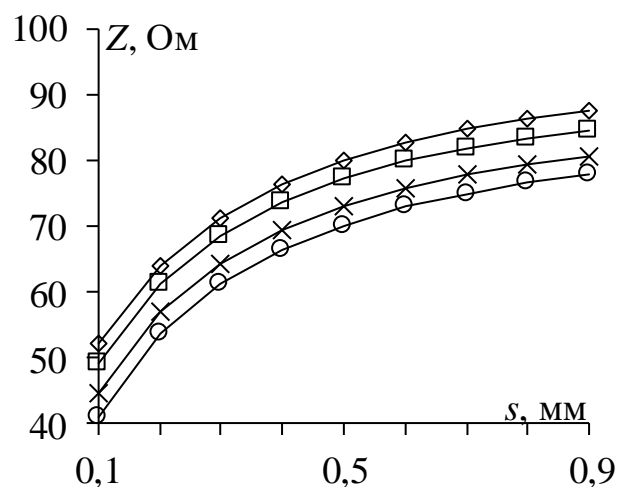
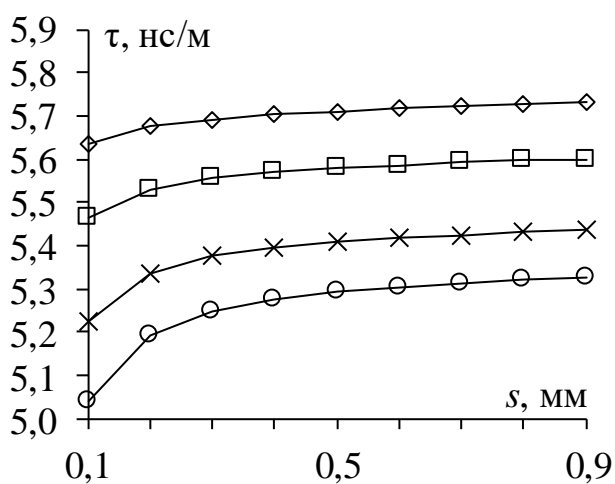
Таблица 4.5 – Относительный модуль (%) отклонений  $Z$ 

$h1$ , мм	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		0,1	–50	0,99	1,06	1,15	1,26	1,35	1,43	1,49
	150	1,70	1,82	1,99	2,18	2,34	2,48	2,60	2,71	2,79
0,2	–50	1,31	1,33	1,37	1,42	1,47	1,51	1,56	1,60	1,64
	150	2,26	2,31	2,38	2,46	2,55	2,64	2,72	2,79	2,86
0,3	–50	1,48	1,49	1,51	1,54	1,57	1,59	1,63	1,66	1,68
	150	2,57	2,59	2,63	2,67	2,72	2,78	2,83	2,89	2,94
0,4	–50	1,59	1,60	1,61	1,62	1,64	1,66	1,68	1,70	1,72
	150	2,77	2,78	2,80	2,83	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01
0,5	–50	1,67	1,67	1,68	1,69	1,70	1,71	1,73	1,74	1,76
	150	2,91	2,92	2,93	2,95	2,97	2,99	3,02	3,04	3,07
0,6	–50	1,72	1,73	1,73	1,74	1,75	1,75	1,76	1,78	1,79
	150	3,01	3,01	3,02	3,03	3,05	3,07	3,08	3,10	3,13
0,7	–50	1,77	1,77	1,77	1,78	1,78	1,79	1,79	1,80	1,81
	150	3,09	3,09	3,10	3,10	3,11	3,13	3,14	3,16	3,17
0,8	–50	1,80	1,80	1,80	1,81	1,81	1,81	1,82	1,83	1,83
	150	3,15	3,15	3,16	3,16	3,17	3,18	3,19	3,20	3,21
0,9	–50	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,84	1,84	1,85	1,85
	150	3,19	3,20	3,20	3,20	3,21	3,22	3,23	3,23	3,24

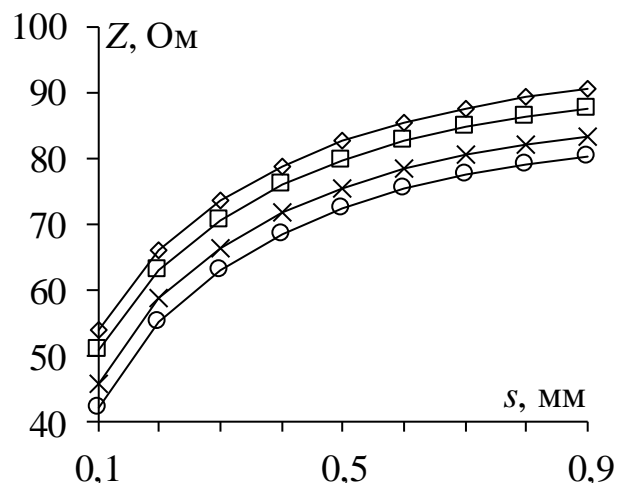
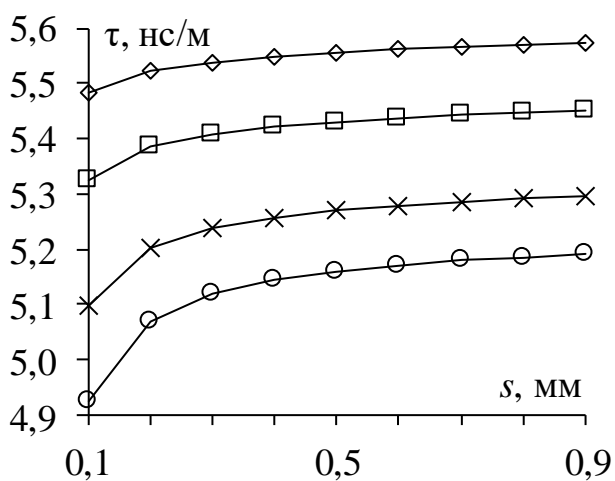
Оценено влияние  $T$  на характеристики МПЛ с боковыми заземленными проводниками [54], с поперечным сечением из рисунка 2.3 а. Выполнено моделирование  $\tau$  и  $Z$  при  $T = -50, 25$  и  $150$  °С и  $s = 0,1-0,9$  мм для  $t = 18, 35, 70$  и  $105$  мкм (рисунок 4.6). Видно, что поведение зависимостей прежний при всех  $T$ . С увеличением  $T$   $\tau$  убывает, а  $Z$  возрастает. Также при увеличении  $s$  зависимости  $\tau$  и  $Z$  плавно увеличиваются, однако изменение  $\tau$  гораздо меньше. Оценка влияния  $T$  приведена в таблицах 4.6 и 4.7. Видно, что с увеличением  $s$  независимо от  $t$  отклонения незначительно возрастают. С ростом  $t$  отклонения растут.



a



б



в

Рисунок 4.6 – Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $s$  при  $T = -50$  (а),  $25$  (б) и  $150$  (в) °С

для  $t = 18$  ( $\diamond$ ),  $35$  ( $\square$ ),  $70$  ( $\times$ ) и  $105$  ( $\circ$ ) мкм

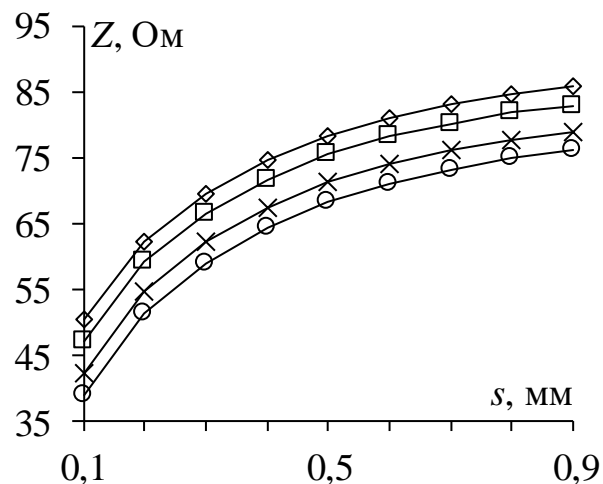
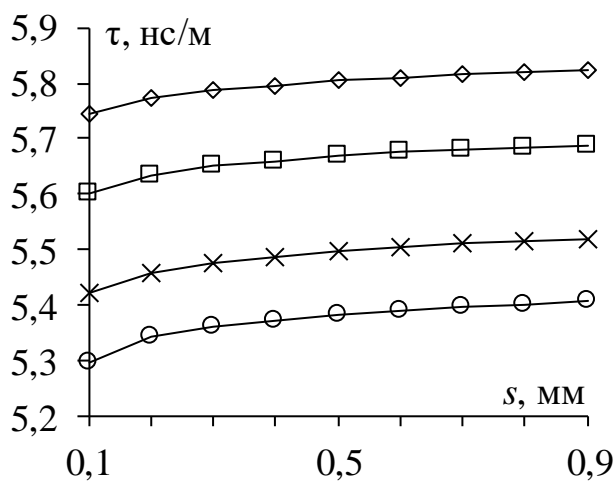
Таблица 4.6 – Относительный модуль (%) отклонений  $\tau$ 

$t$ , МКМ	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		18	–50	1,57	1,58	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60
	150	2,75	2,77	2,78	2,79	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80
35	–50	1,52	1,54	1,55	1,55	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
	150	2,66	2,69	2,71	2,71	2,72	2,72	2,73	2,73	2,73
70	–50	1,44	1,48	1,49	1,50	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51
	150	2,51	2,58	2,61	2,62	2,63	2,63	2,63	2,64	2,64
105	–50	1,37	1,43	1,45	1,46	1,47	1,47	1,47	1,48	1,48
	150	2,39	2,50	2,53	2,55	2,56	2,56	2,57	2,57	2,57

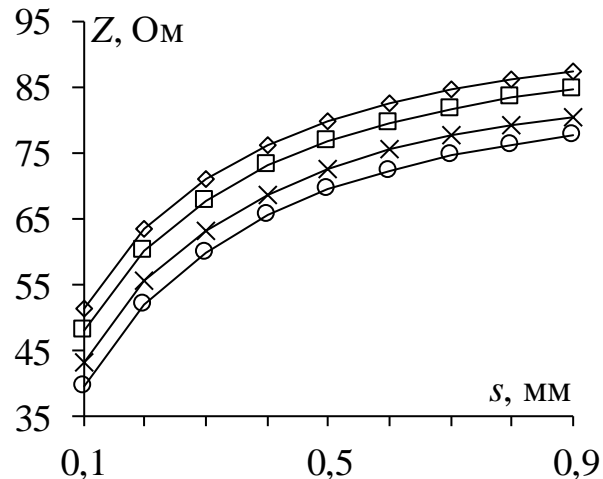
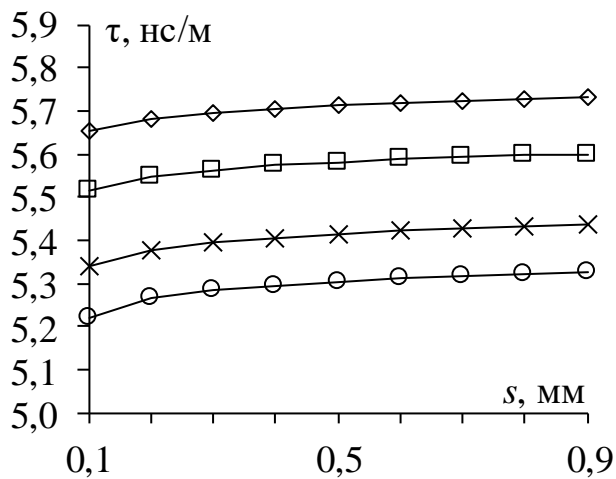
Таблица 4.7 – Относительный модуль (%) отклонений  $Z$ 

$t$ , МКМ	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		18	–50	1,70	1,72	1,74	1,77	1,79	1,81	1,83
	150	2,98	3,02	3,06	3,10	3,14	3,17	3,21	3,24	3,27
35	–50	1,69	1,72	1,75	1,77	1,79	1,82	1,84	1,85	1,87
	150	1,66	1,69	1,72	1,74	1,76	1,78	1,80	1,82	1,84
70	–50	1,66	1,70	1,73	1,76	1,78	1,81	1,83	1,85	1,87
	150	2,92	2,99	3,04	3,08	3,13	3,17	3,22	3,25	3,28
105	–50	1,64	1,68	1,71	1,74	1,77	1,79	1,82	1,84	1,86
	150	2,87	2,94	3,00	3,05	3,10	3,15	3,19	3,23	3,26

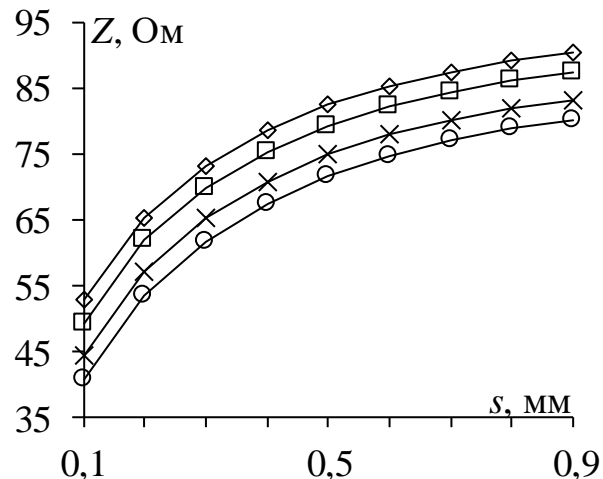
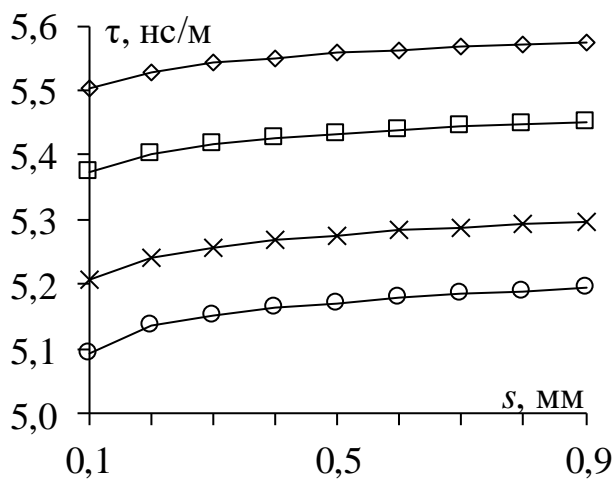
Оценено влияние  $T$  на характеристики МПЛ с поперечным сечением из рисунка 2.3 б. Выполнено аналогичное моделирование (рисунок 4.7). Видно, поведение зависимостей прежний при всех  $T$ . С увеличением  $T$   $\tau$  убывает, а  $Z$  возрастает. Также при увеличении  $s$  зависимости  $\tau$  и  $Z$  плавно увеличиваются, однако изменение  $\tau$  гораздо меньше. Оценка влияния  $T$  приведена в таблицах 4.8 и 4.9. Видно, что с увеличением  $s$  независимо от  $t$  отклонения возрастают.



а



б



в

Рисунок 4.7 – Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $s$  при  $T = -50$  (а), 25 (б) и 150 (в) °Cдля  $t = 18$  (◇), 35 (□), 70 (×) и 105 (○) мкм

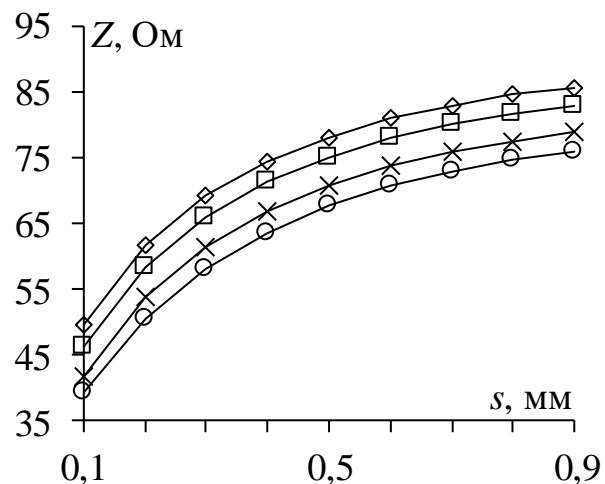
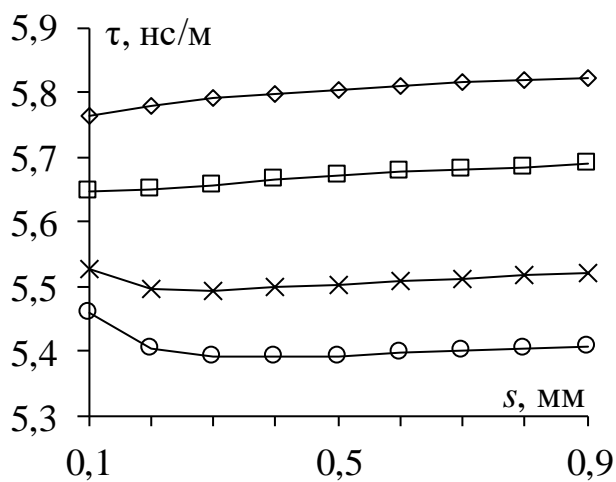
Таблица 4.8 – Относительный модуль (%) отклонений  $\tau$ 

$t$ , МКМ	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		18	–50	1,58	1,59	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60
150	2,76		2,78	2,78	2,79	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80
35	–50	1,54	1,55	1,55	1,55	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
	150	2,68	2,70	2,71	2,72	2,72	2,72	2,73	2,73	2,73
70	–50	1,48	1,49	1,50	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
	150	2,58	2,61	2,62	2,62	2,63	2,63	2,63	2,64	2,64
105	–50	1,44	1,46	1,46	1,47	1,47	1,47	1,47	1,48	1,48
	150	2,51	2,54	2,55	2,56	2,56	2,57	2,57	2,57	2,57

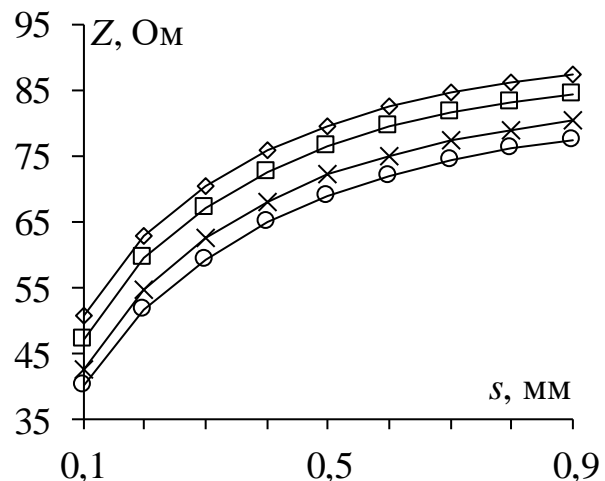
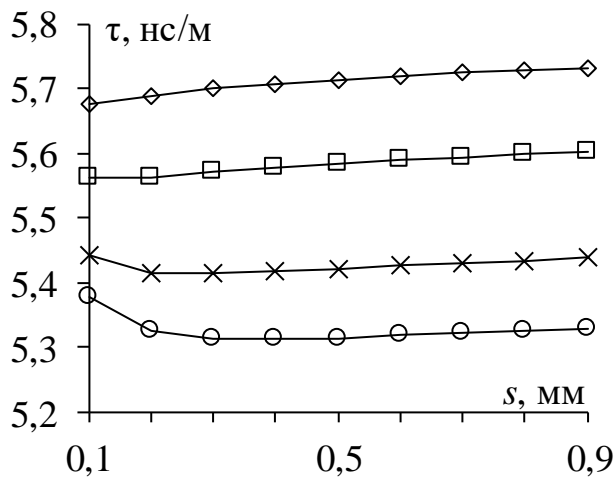
Таблица 4.9 – Относительный модуль (%) отклонений  $Z$ 

$t$ , МКМ	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		18	–50	1,73	1,76	1,79	1,81	1,83	1,85	1,87
150	3,04		3,10	3,14	3,18	3,22	3,25	3,29	3,32	3,35
35	–50	1,71	1,75	1,78	1,81	1,83	1,86	1,88	1,89	1,91
	150	3,00	3,08	3,13	3,18	3,22	3,26	3,30	3,33	3,36
70	–50	1,65	1,72	1,76	1,79	1,82	1,85	1,87	1,89	1,91
	150	2,89	3,01	3,09	3,14	3,20	3,24	3,28	3,32	3,35
105	–50	1,60	1,68	1,73	1,77	1,80	1,83	1,85	1,87	1,90
	150	2,80	2,94	3,03	3,10	3,16	3,21	3,26	3,30	3,33

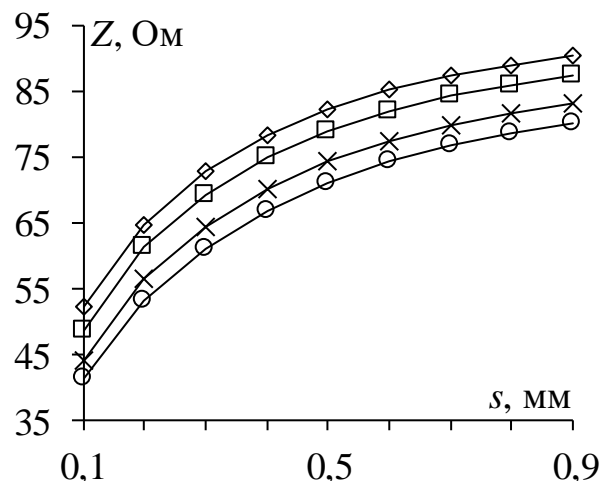
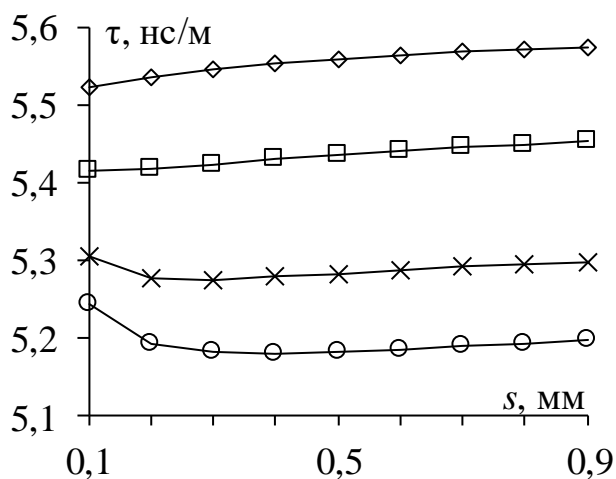
Оценено влияние  $T$  на характеристики МПЛ из рисунка 2.3 в. Аналогичное моделирование (рисунок 4.8) показывает прежнее поведение зависимостей при всех  $T$ . С ростом  $T$   $\tau$  убывает, а  $Z$  возрастает. Рост  $t$  уменьшает чувствительность  $\tau$  к изменению  $s$ , вплоть до нулевой. Оценка влияния  $T$  приведена в таблицах 4.10 и 4.11. Видно, что с увеличением  $s$  независимо от  $t$  отклонения возрастают.



а



б



в

Рисунок 4.8 – Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $s$  при  $T = -50$  (а),  $25$  (б) и  $150$  (в) °С

для  $t = 18$  ( $\diamond$ ),  $35$  ( $\square$ ),  $70$  ( $\times$ ) и  $105$  ( $\circ$ ) мкм

Таблица 4.10 – Относительный модуль (%) отклонений  $\tau$ 

$t$ , МКМ	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		18	–50	1,58	1,59	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60
	150	2,77	2,78	2,78	2,79	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80
35	–50	1,55	1,55	1,55	1,55	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
	150	2,70	2,71	2,71	2,72	2,72	2,72	2,73	2,73	2,73
70	–50	1,51	1,50	1,50	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
	150	2,63	2,62	2,62	2,63	2,63	2,63	2,63	2,64	2,64
105	–50	1,49	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,48	1,48	1,48
	150	2,60	2,57	2,56	2,56	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57

Таблица 4.11 – Относительный модуль (%) отклонений  $Z$ 

$t$ , МКМ	$s$ , мм $T$ , °С	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		18	–50	1,75	1,77	1,79	1,82	1,84	1,86	1,87
	150	3,08	3,12	3,15	3,19	3,23	3,26	3,29	3,32	3,35
35	–50	1,74	1,77	1,79	1,82	1,84	1,86	1,88	1,90	1,91
	150	3,07	3,11	3,16	3,19	3,23	3,27	3,30	3,34	3,36
70	–50	1,72	1,75	1,78	1,81	1,83	1,85	1,87	1,89	1,91
	150	3,02	3,08	3,13	3,17	3,22	3,25	3,29	3,33	3,36
105	–50	1,70	1,73	1,76	1,79	1,81	1,84	1,86	1,88	1,90
	150	2,98	3,04	3,09	3,14	3,19	3,23	3,27	3,31	3,34

Оценено влияние температуры на характеристики МПЛ с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку, поперечное сечение которой представлено на рисунке 2.2 б. Выполнено моделирование чувствительности характеристик  $\tau$  и  $Z$  при изменении  $T = -50, 25$  и  $150$  °С и  $s = 0,1 - 0,9$  мм для  $h_1 = 0,1 - 0,9$  мм (рисунок 4.9). Видно, что поведение зависимостей остаётся одинаковым при всех  $T$ . С увеличением  $T$  значения  $\tau$  уменьшаются, а  $Z$

увеличивается. При увеличении  $s$  зависимости  $\tau$  плавно уменьшаются, а  $Z$  – увеличиваются. При малых значениях  $h_1$  изменения  $\tau$  и  $Z$  независимо от  $T$  малы, однако рост  $h_1$  приводит к увеличению  $\tau$  и уменьшению  $Z$ , причем при малых значениях  $s$  изменения  $\tau$  и  $Z$  более выражены. Оценка влияния  $T$  приведена в таблицах 4.12 и 4.13. Оценка  $\tau$  показывает, что с увеличением  $s$  отклонения незначительно уменьшается, а с увеличением  $h_1$  увеличивается. Оценка  $Z$  показывает, что с увеличением  $s$  и  $h_1$  отклонения  $T$  уменьшается.



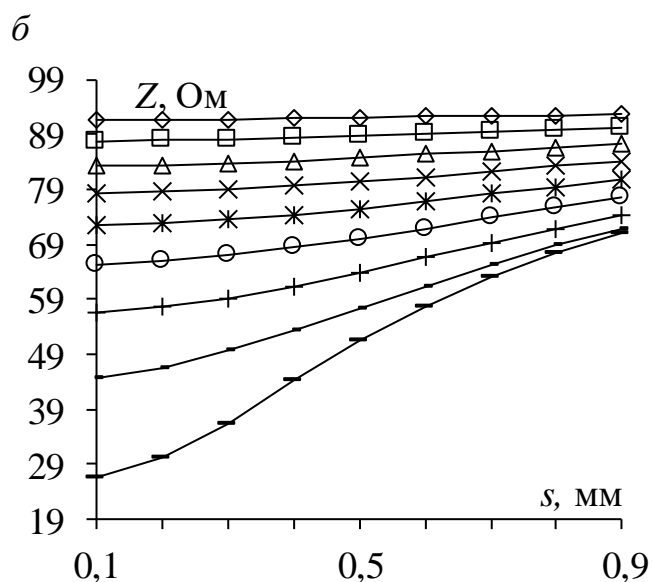
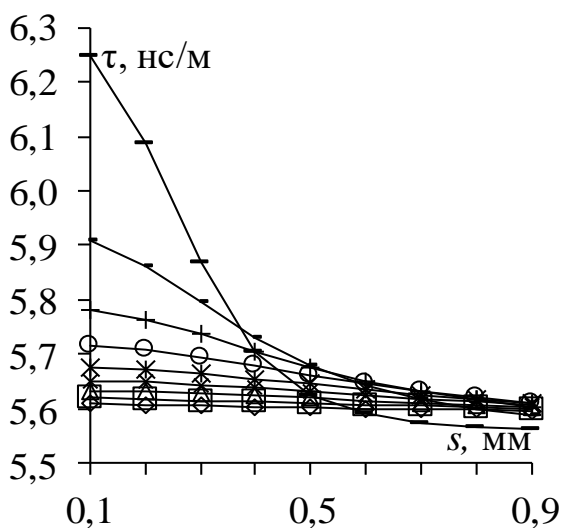
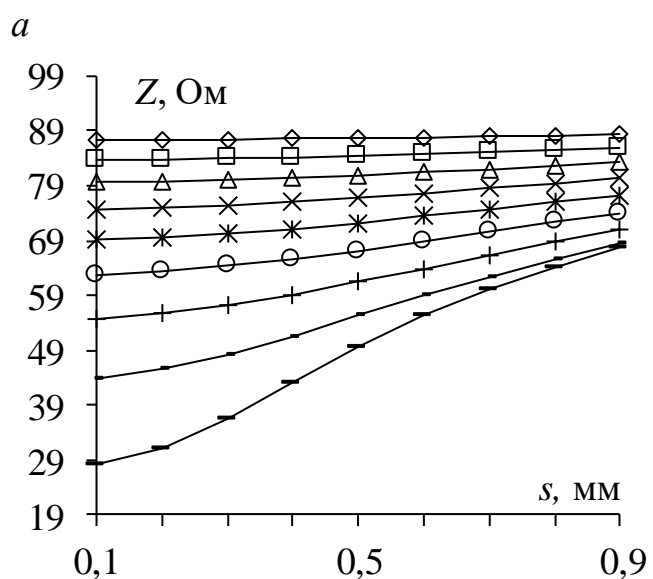
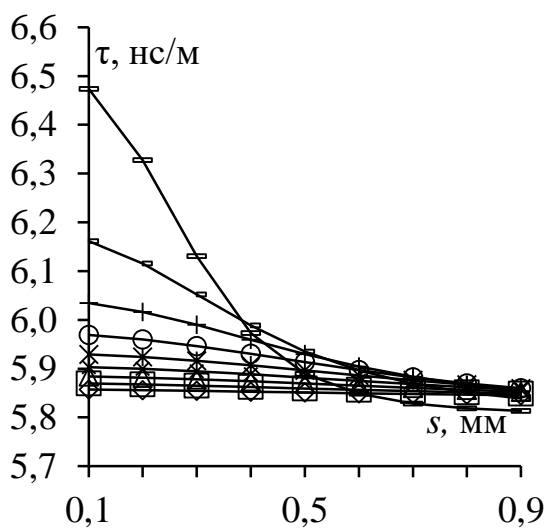
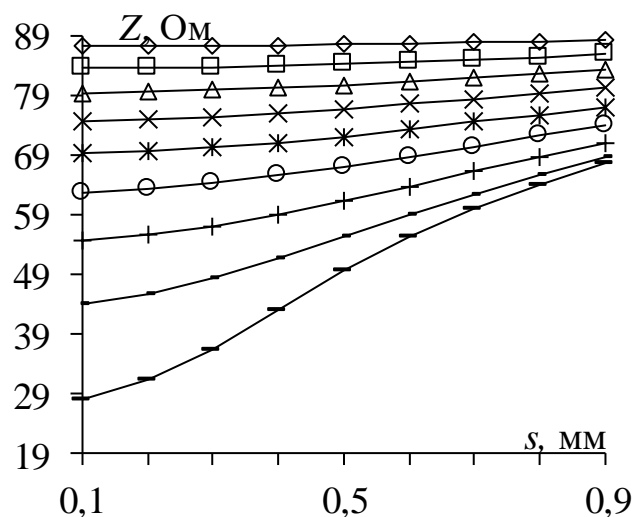
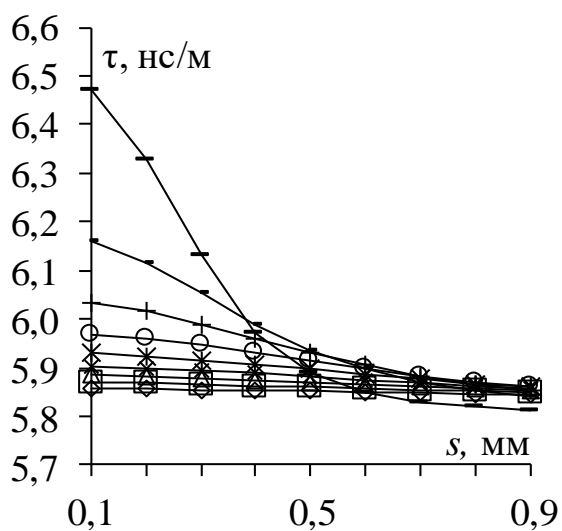


Рисунок 4.9 – Зависимости  $\tau$  и  $Z$  от  $s$  при  $T = -50$  (а),  $25$  (б) и  $150$  (в) °С  
 для  $h_1 = 0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,4$  ( $\times$ ),  $0,5$  (ж),  $0,6$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $+$ ),  $0,8$  ( $-$ ) и  $0,9$  ( $-$ ) мм

Таблица 4.12 – Относительный модуль (%) отклонений  $\tau$ 

$h1,$ мм	$s, \text{ мм}$ $T, \text{ }^\circ\text{C}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
		0,1	–50	1,60	1,60	1,60	1,60	1,59	1,59	1,59
	150	2,80	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79
0,2	–50	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,59	1,59	1,59	1,59
	150	2,80	2,80	2,80	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79
0,3	–50	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,59	1,59	1,59
	150	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,79	2,79	2,79	2,79
0,4	–50	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,59
	150	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,79	2,79	2,79
0,5	–50	1,59	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
	150	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
0,6	–50	1,59	1,59	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
	150	2,79	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
0,7	–50	1,57	1,58	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
	150	2,76	2,77	2,78	2,80	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81
0,8	–50	1,52	1,55	1,58	1,61	1,62	1,62	1,62	1,61	1,61
	150	2,68	2,72	2,78	2,82	2,84	2,84	2,83	2,82	2,82
0,9	–50	1,31	1,41	1,59	1,69	1,69	1,66	1,64	1,62	1,61
	150	2,29	2,48	2,80	2,98	2,95	2,90	2,86	2,84	2,82

Таблица 4.13 – Относительный модуль (%) отклонений  $Z$ 

$h1,$ мм	$s, \text{ мм}$ $T, \text{ }^\circ\text{C}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	0,1	-50	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,81
150		3,17	3,18	3,18	3,18	3,18	3,19	3,19	3,19	3,20
0,2	-50	1,77	1,77	1,77	1,78	1,78	1,78	1,78	1,79	1,79
	150	3,13	3,13	3,14	3,14	3,15	3,15	3,16	3,16	3,17
0,3	-50	1,73	1,74	1,74	1,74	1,75	1,75	1,76	1,76	1,77
	150	3,07	3,07	3,08	3,09	3,09	3,11	3,11	3,12	3,13
0,4	-50	1,68	1,68	1,69	1,70	1,71	1,71	1,72	1,74	1,74
	150	2,98	2,99	3,00	3,01	3,02	3,04	3,06	3,07	3,09
0,5	-50	1,60	1,60	1,61	1,63	1,65	1,67	1,68	1,70	1,72
	150	2,84	2,85	2,87	2,90	2,93	2,96	2,99	3,02	3,04
0,6	-50	1,46	1,48	1,50	1,54	1,57	1,60	1,64	1,67	1,69
	150	2,60	2,63	2,68	2,73	2,79	2,86	2,91	2,96	3,00
0,7	-50	1,20	1,24	1,31	1,39	1,47	1,53	1,59	1,64	1,68
	150	2,14	2,22	2,34	2,48	2,61	2,74	2,83	2,91	2,97
0,8	-50	0,58	0,72	0,93	1,15	1,35	1,49	1,59	1,66	1,70
	150	1,05	1,31	1,68	2,08	2,41	2,66	2,83	2,94	3,01
0,9	-50	1,75	1,05	0,07	0,87	1,40	1,63	1,74	1,78	1,81
	150	3,29	2,00	0,14	1,62	2,55	2,94	3,10	3,17	3,19

## 4.2 Оценка влияния температуры на собственные значения и векторы произведения матриц $L$ и $C$ и временные отклики модифицированных микрополосковых линий

### 4.2.1 Микрополосковая линия, покрытая заземленным проводником

Оценено влияние температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики, МПЛ, покрытой с заземленным проводником, поперечное сечение которой представлено на рисунке 3.2. Согласно анализу подраздела 3.2 и из рисунка 3.11, выявлено, что при  $w=0,9$  мм и  $h1=0,2$  мм амплитуды импульсов СКИ выравниваются. Поэтому целесообразно выполнить подобный анализ при  $T=-50, 25$  и  $150$  °С и данных значениях параметров, а также с учетом изменения  $\epsilon_r=5,6$ .

На рисунке 4.10 приведены зависимости значений погонных задержек ( $\tau_i$ ) от  $T$ . Как видно, влияние  $T$  на  $\tau_2$  существенно. Так, отклонения составляют 0,11% для  $\tau_1$  и 4,97% для  $\tau_2$ .

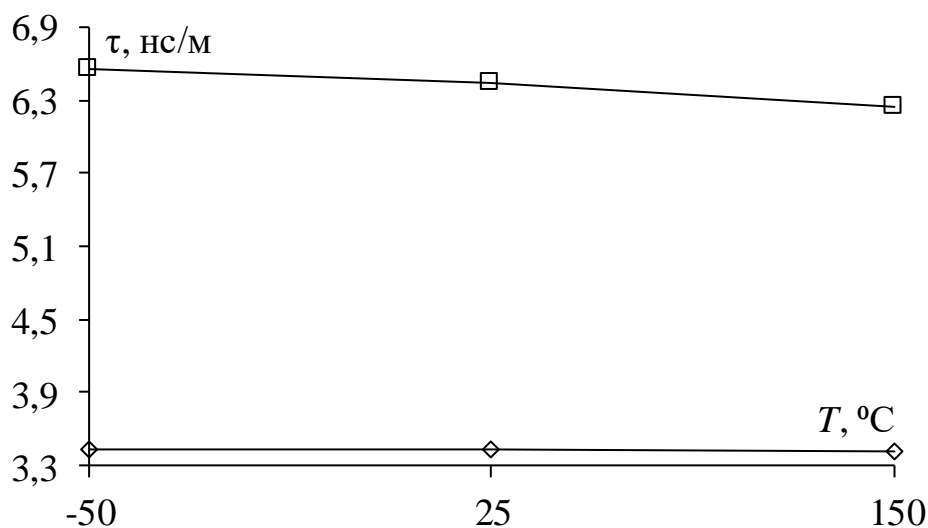


Рисунок 4.10 – Зависимости  $\tau_1$  ( $\diamond$ ) и  $\tau_2$  ( $\square$ ) от  $T$

На рисунке 4.11 представлены зависимости элементов собственных векторов напряжения. Влияние  $T$  очень мало.

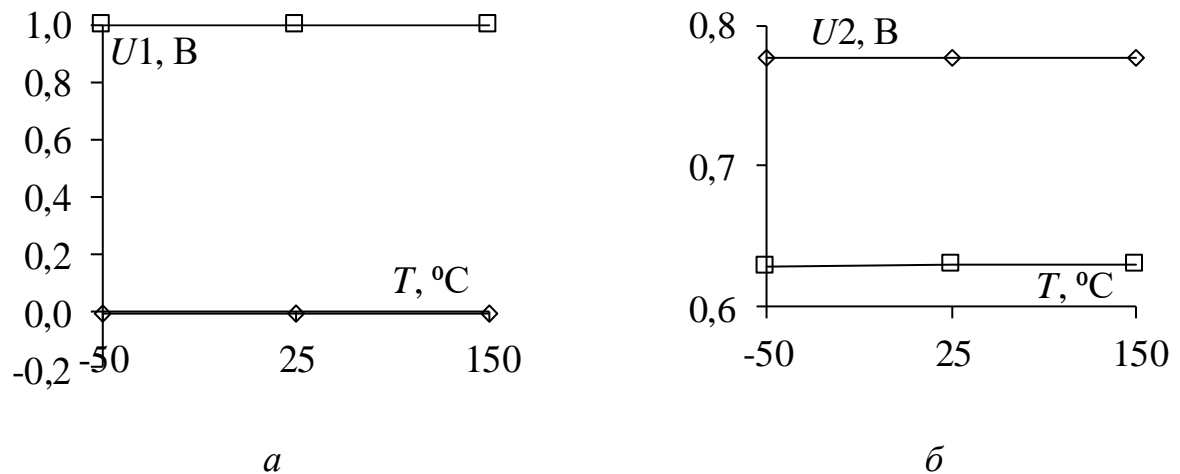


Рисунок 4.11 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $T$  для  $\tau_1$  (а) и  $\tau_2$  (б)

На рисунке 4.12 представлены временные отклики (здесь и далее при длине МПЛ 1 м) при изменении  $T$ . Амплитуда импульса 1 с увеличением  $T$  незначительно увеличивается с 1,15 В до 1,17 В, а импульса 2 уменьшается с 1,27 В до 1,25 В. Таким образом, влияние  $T$  на амплитуды импульсов мало. Между тем оно существенно задержку импульса 2. В результате разность задержек уменьшилась с 3,21 нс при  $T = -50$  °С до 2,83 нс при  $T = 150$  °С, т.е. на 12%.

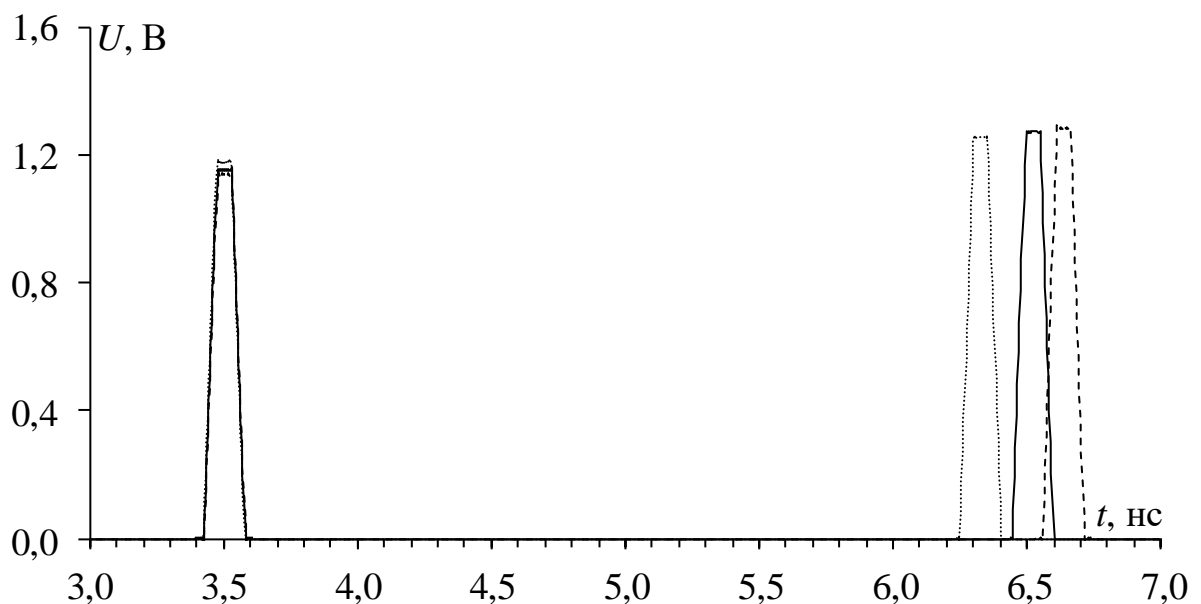


Рисунок 4.12 – Формы напряжения на выходе при  $T = -50$  (---), 25 (—), 150 (· ·) °С

### 4.2.2 Микрополосковая линия с двумя боковыми заземленными проводниками

Оценено влияние температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики МПЛ с боковыми заземленными проводниками сверху, поперечное сечение которой представлено на рисунке 3.18. Согласно анализу подраздела 3.3 по рисунку 3.45  $\delta$ , выявлено, что при  $h_1=0,1$  мм и  $s=0,49$  мм амплитуды импульсов выравниваются. Поэтому целесообразно выполнить подобный анализ при  $T=-50, 25$  и  $150$  °С при данных значениях параметров, а также с учетом изменения  $\epsilon_r=5,6$ .

На рисунке 4.13 приведены зависимости значений погонных задержек ( $\tau_i$ ) от  $T$ . Как видно, влияние  $T$  на  $\tau_3$  существенно. Так, отклонения составляют 1,46% для  $\tau_1$ , 1,77% для  $\tau_2$  и 4,46 % для  $\tau_3$ .

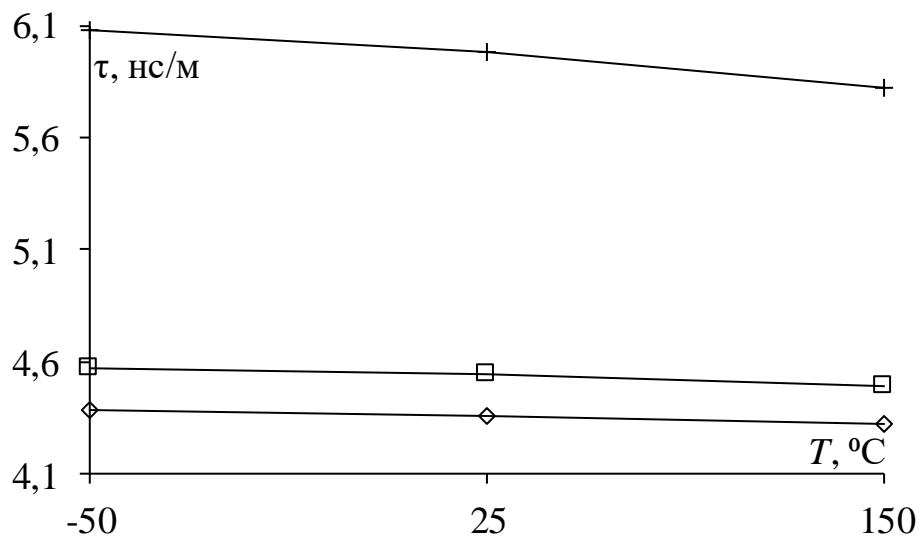


Рисунок 4.13 – Зависимости  $\tau_1$  (◇),  $\tau_2$  (□) и  $\tau_3$  (+) от  $T$

На рисунке 4.14 представлены зависимости элементов собственных векторов напряжения. Влияние  $T$  очень мало.

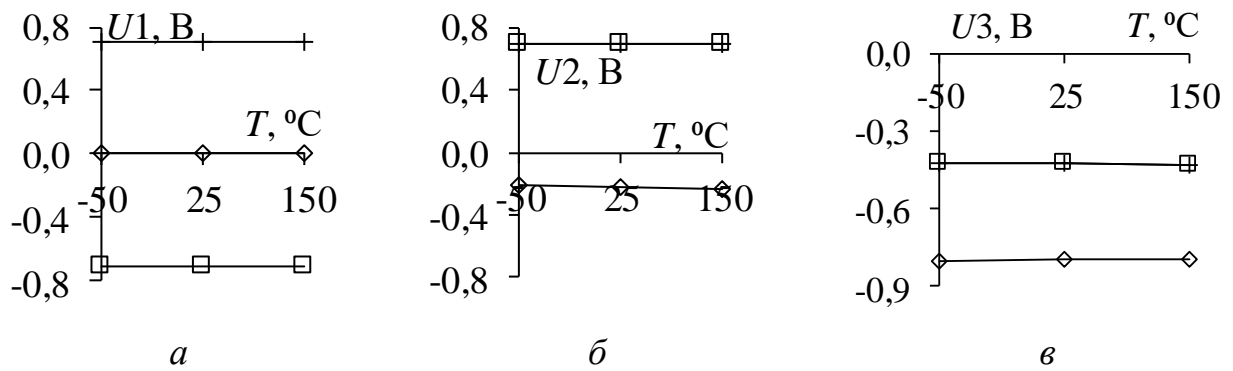


Рисунок 4.14 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $T$  для  $\tau_1(a)$ ,  $\tau_2(b)$  и  $\tau_3(v)$

На рисунке 4.15 представлены временные отклики при изменении  $T$ . С увеличением  $T$  амплитуда импульса 1 увеличивается с 1,09 В до 1,15 В, а импульса 2 уменьшается с 1,37 В до 1,30 В. Таким образом, влияние  $T$  на временной отклик мало по амплитуде. Между тем по задержкам мод оно существенно. В результате разность задержек составила 1,55 нс при  $T = -50$  °С и 1,33 нс при  $T = 150$  °С, т.е. уменьшилась на 14%.

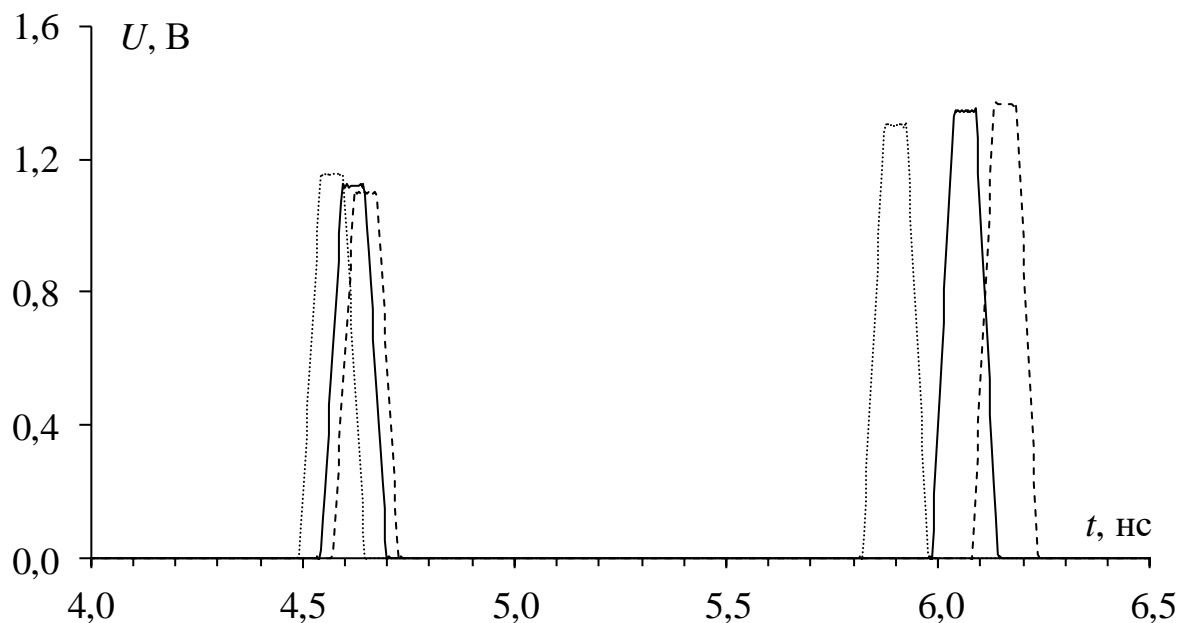


Рисунок 4.15 – Формы напряжения на выходе при  $T = -50$  (---), 25 (—), 150 (· · ·) °С

Оценено влияние температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики МПЛ с боковыми заземленными проводниками, поперечное сечение которой представлено на рисунке 3.50. Согласно анализу подраздела 3.3

выявлено, что с увеличением  $s$  возрастает амплитуда второго импульса, однако при данных параметрах амплитуды импульсов не могут быть выравнены. Так, максимально большая амплитуда второго импульса, приближенная к амплитуде первого импульса, в данной линии получена при  $s=0,9$  мм для всех  $t$ . Поэтому целесообразно выполнить подобный анализ с учетом влияния  $T$  при данных параметрах, на примере для  $t=18$  мкм, а также с учетом изменения  $\varepsilon_r=5,6$ .

На рисунке 4.16 приведены зависимости значений погонных задержек ( $\tau_i$ ) от  $T$ . Как видно, влияние  $T$  на  $\tau_i$  существенно. Так, отклонения составляют 4,68% для  $\tau_1$ , 4,86% для  $\tau_2$  и 5,12% для  $\tau_3$ .

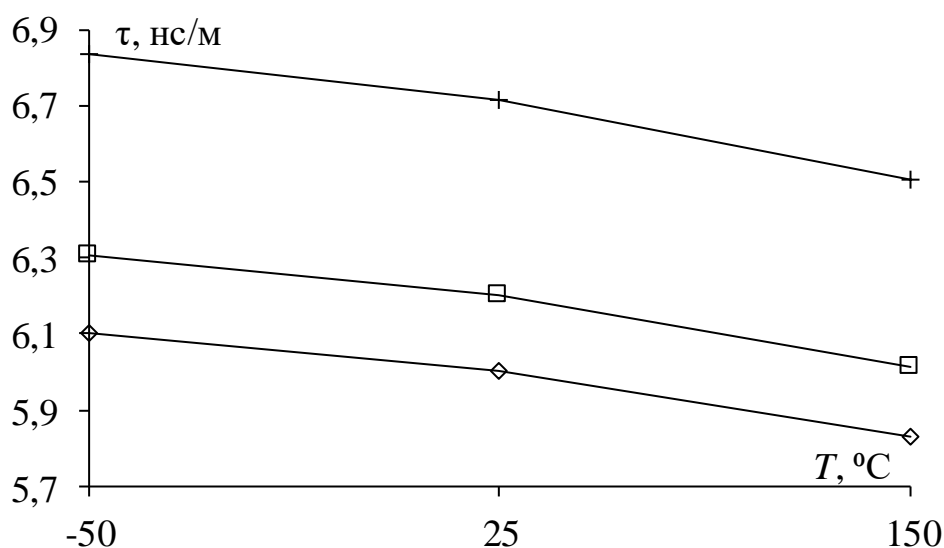


Рисунок 4.16 – Зависимости  $\tau_1$  (◇),  $\tau_2$  (□) и  $\tau_3$  (+) от  $T$  (—)

На рисунке 4.17 представлены зависимости элементов собственных векторов напряжения. Влияние  $T$  очень мало.



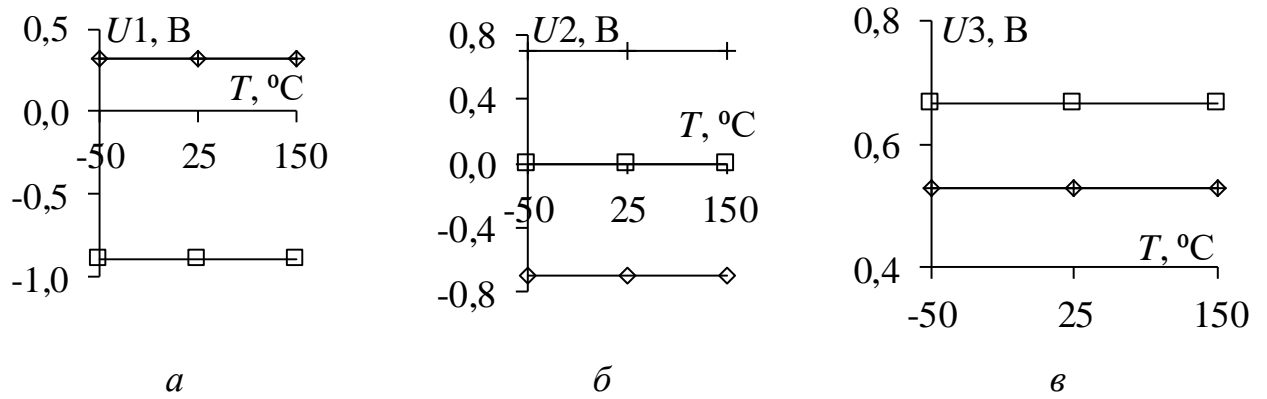


Рисунок 4.17 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $T$  для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 4.18 представлены временные отклики при изменении  $T$ . С увеличением  $T$  амплитуда импульса 1 незначительно уменьшается с 1,77 В до 1,75 В, а импульса 2 – с 0,5 В до 0,49 В. Таким образом, влияние  $T$  на временной отклик мало по амплитуде. Между тем по задержкам оно существенно. В результате разность задержек составила 0,74 нс при  $T = -50$  °С и 0,67 нс при  $T = 150$  °С, т.е. уменьшилась на 9%.

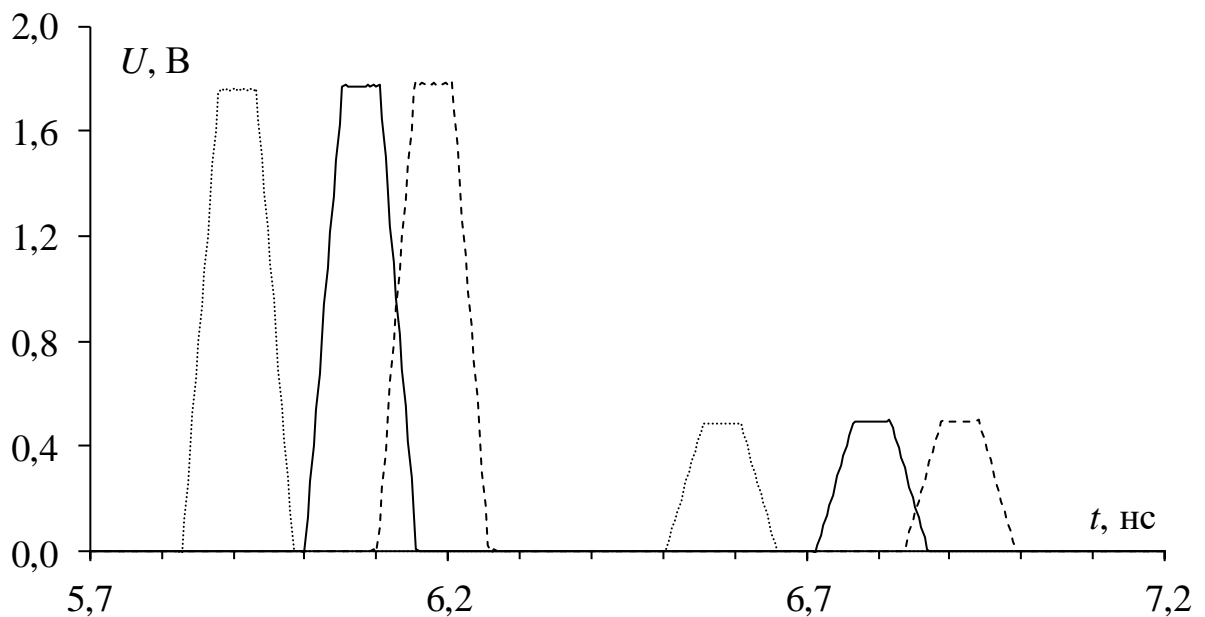


Рисунок 4.18 – Формы напряжения на выходе при  $T = -50$  (---), 25 (—), 150 (· ·) °С

Оценено влияние температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики МПЛ с боковыми заземленными проводниками посреди границы воздух-подложка, поперечное сечение которой представлено на

рисунке 3.63. Согласно анализу подраздела 3.3 выявлено, что с увеличением  $s$  возрастает амплитуда импульса 2, однако при данных параметрах амплитуды импульсов не могут быть выравнены. Максимально большая амплитуда второго импульса при  $s=0,9$  мм для всех  $t$ . Поэтому целесообразно выполнить подобный анализ с учетом влияния  $T$  для  $t=18$  мкм, а также с учетом изменения  $\epsilon_r=5,6$ .

На рисунке 4.19 приведены зависимости значений погонных задержек ( $\tau_i$ ) от  $T$ . Как видно, влияние  $T$  на  $\tau_i$  существенно. Так, отклонения составляют 4,70% для  $\tau_1$ , 4,94% для  $\tau_2$  и 5,16 % для  $\tau_3$ .

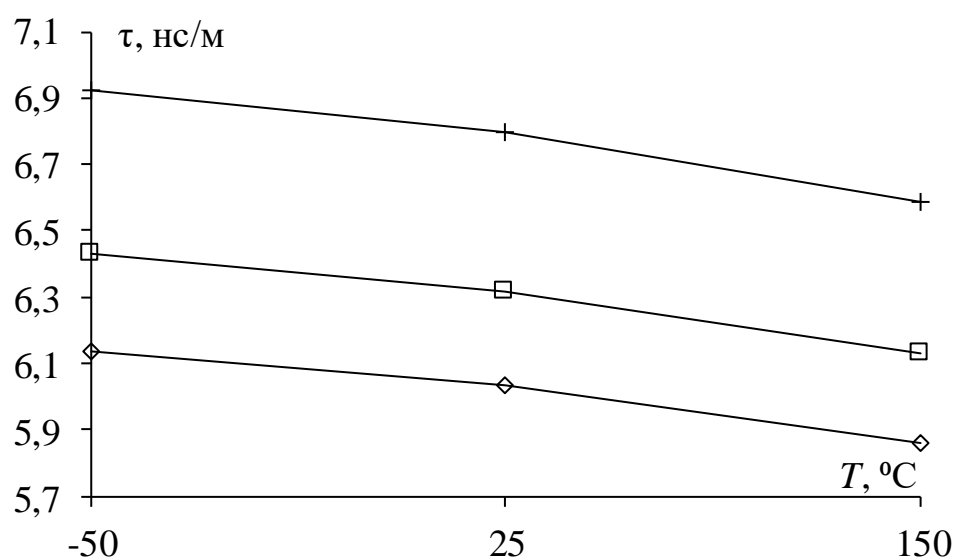


Рисунок 4.19 – Зависимости  $\tau_1$  (◇),  $\tau_2$  (□) и  $\tau_3$  (+) от  $T$  (–)

На рисунке 4.20 представлены зависимости элементов собственных векторов напряжения. Влияние  $T$  очень мало.

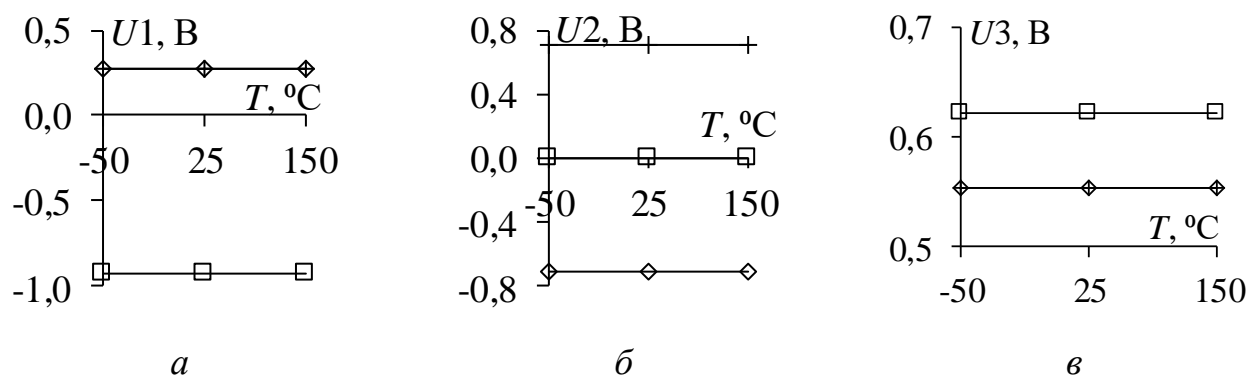


Рисунок 4.20 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $T$  для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 4.21 представлены временные отклики при изменении  $T$ . С увеличением  $T$  амплитуда импульса 1 незначительно уменьшается с 1,91 В до 1,88 В, а импульса 2 – с 0,37 В до 0,36 В. Таким образом, влияние  $T$  на временной отклик мало по амплитуде. Между тем по задержкам существенно. В результате разность задержек составила 0,8 нс при  $T = -50$  °С и 0,71 нс  $T = 150$  °С, т.е. уменьшилась на 11%.

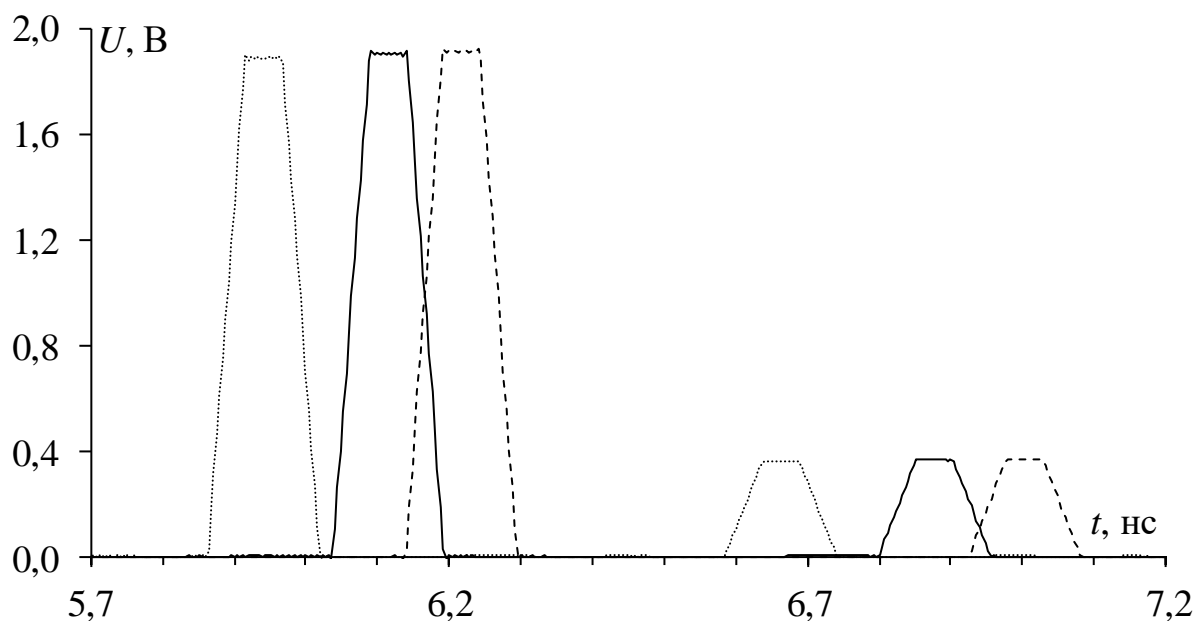


Рисунок 4.21 – Формы напряжения на выходе при  $T = -50$  (---), 25 (—), 150 (· · ·) °С

Оценено влияние температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики МПЛ с проводниками под границей воздух-подложка, поперечное сечение которой представлено на рисунке 3.63. Согласно анализу

подраздела 3.3 выявлено, что с увеличением  $s$  возрастает амплитуда второго импульса, однако при данных параметрах амплитуды импульсов не могут быть выравнены. Аналогично максимально большая амплитуда второго импульса при  $s=0,9$  мм для всех  $t$ . Поэтому целесообразно выполнить подобный анализ с учетом влияния  $T$  при данных параметрах, а также с учетом изменения  $\varepsilon_r=5,6$ .

На рисунке 4.22 приведены зависимости значений погонных задержек ( $\tau_i$ ) от  $T$ . Как видно, влияние  $T$  на  $\tau_i$  существенно. Так, отклонения составляют 4,72% для  $\tau_1$ , 5,0% для  $\tau_2$  и 5,21 % для  $\tau_3$ .

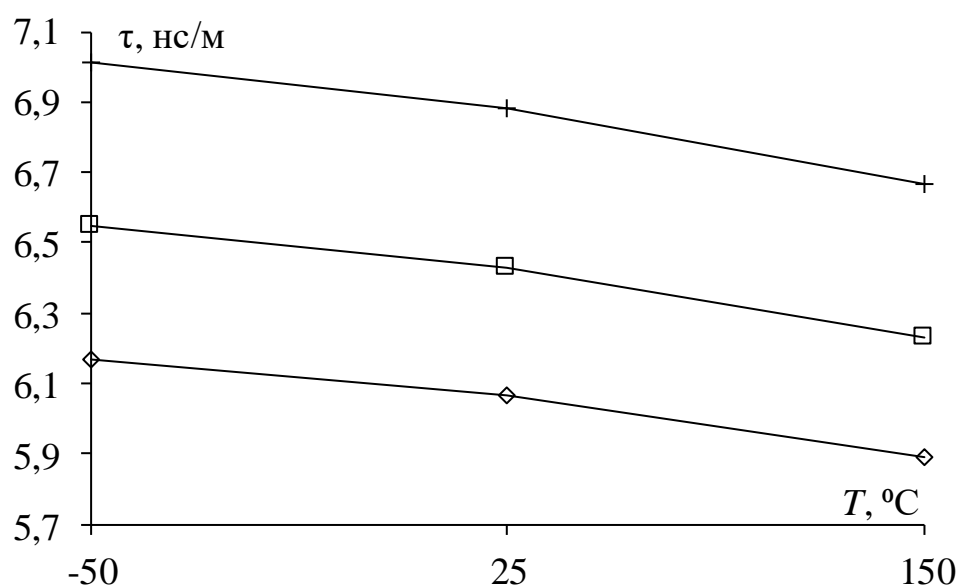


Рисунок 4.22 – Зависимости  $\tau_1$  (◇),  $\tau_2$  (□) и  $\tau_3$  (+) от  $T$  (—)

На рисунке 4.23 представлены зависимости элементов собственных векторов напряжения. Влияние  $T$  очень мало.

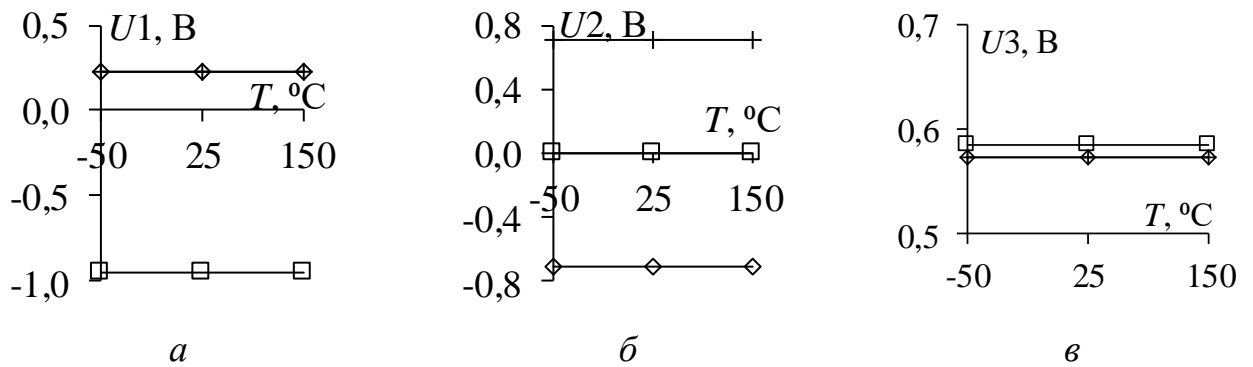


Рисунок 4.23 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $T$  для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 4.24 представлены временные отклики при изменении  $T$ . С увеличением  $T$  амплитуда импульса 1 незначительно уменьшается с 2 В до 1,97 В, а импульса 2 – с 0,27 В до 0,26 В. Таким образом, влияние  $T$  на временной отклик мало по амплитуде. Между тем по задержкам оно существенно. В результате разность задержек составила 0,85 нс при  $T = -50$  °С и 0,76 нс при  $T = 150$  °С, т.е. уменьшилась на 11%.

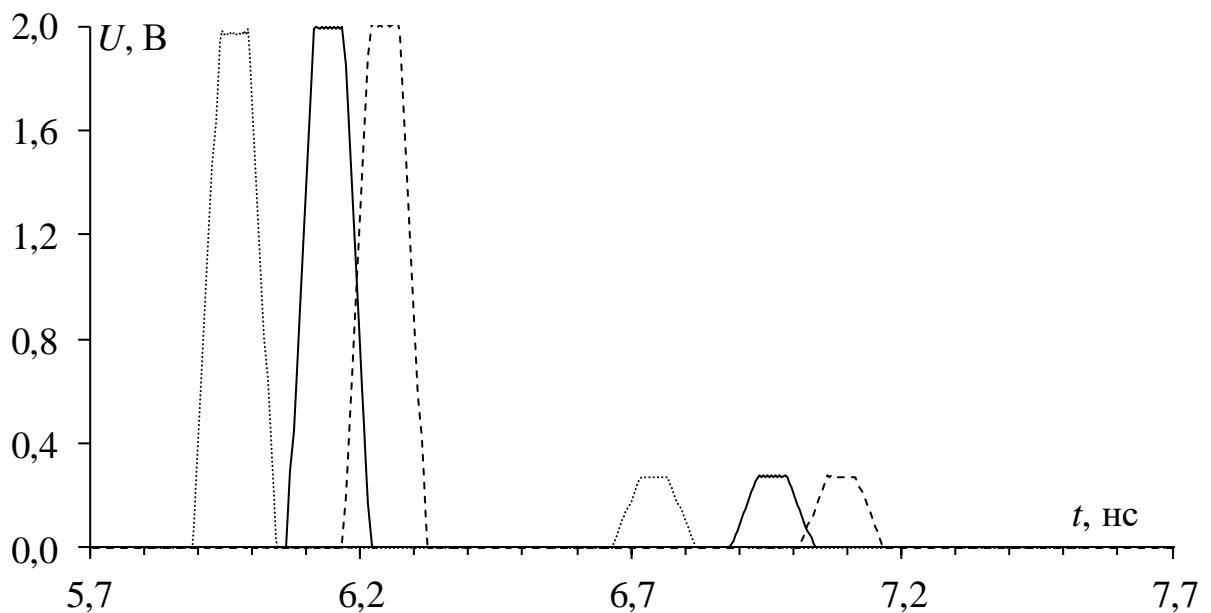


Рисунок 4.24 – Формы напряжения на выходе при  $T = -50$  (---), 25 (—), 150 (· ·) °С

Оценено влияние температуры на собственные значения и векторы, а также временные отклики МПЛ с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку, поперечное сечение которой представлено на

рисунке 3.89. Согласно анализу подраздела 3.3, выявлено, что амплитуды импульсов не могут быть выравнены в данной линии и по рисунку 3.92 *a* показан результат при геометрических параметрах  $h_1=0,9$  мм и  $s=0,1$  мм. Поэтому целесообразно выполнить подобный анализ с учетом влияния  $T$  при данных параметрах, а также с учетом изменения  $\epsilon_r=5,6$ .

На рисунке 4.25 приведены зависимости значений погонных задержек ( $\tau_i$ ) от  $T$ . Как видно, влияние  $T$  на  $\tau_i$  существенно. Так, отклонения составляют 5,16% для  $\tau_1$ , 5,24% для  $\tau_2$  и 5,24% для  $\tau_3$ .

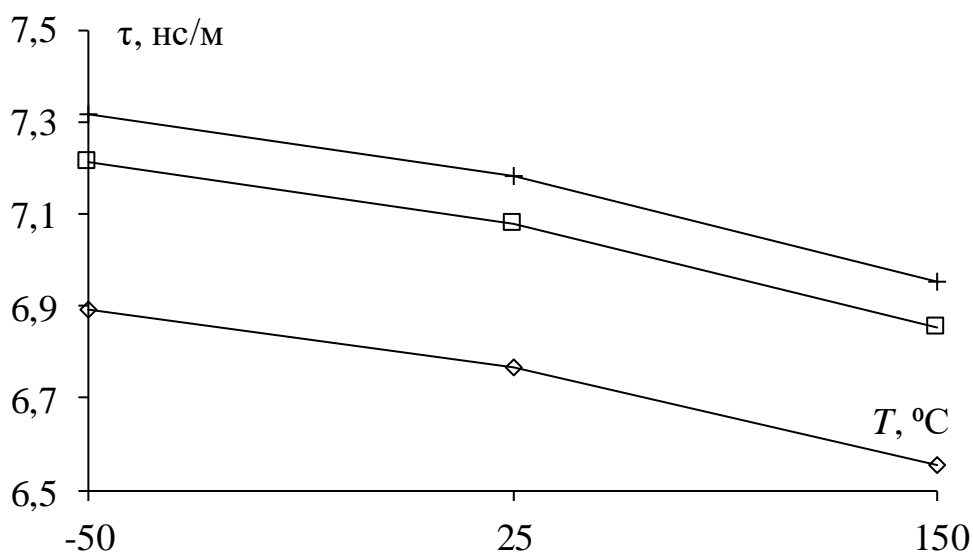


Рисунок 4.25 – Зависимости  $\tau_1$  (◇),  $\tau_2$  (□) и  $\tau_3$  (+) от  $T$  (—)

На рисунке 4.26 представлены зависимости элементов собственных векторов напряжения. Влияние  $T$  очень мало.

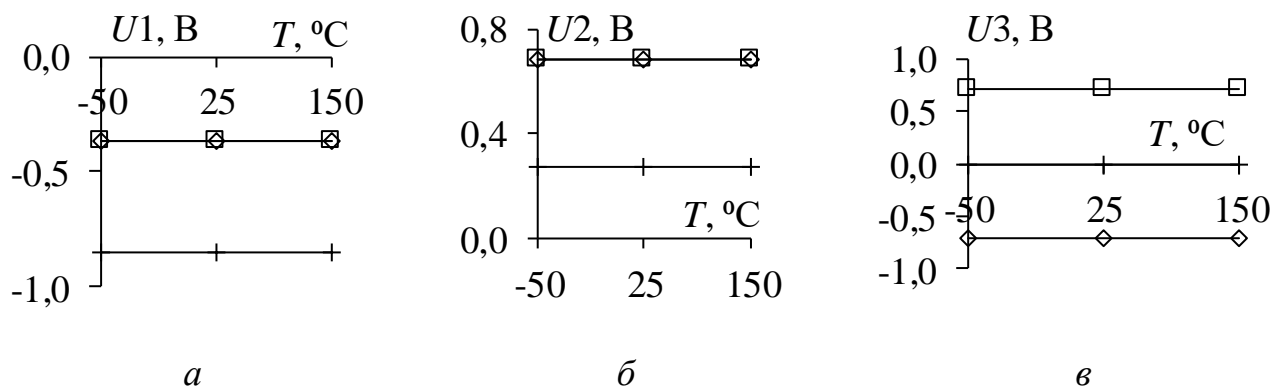


Рисунок 4.26 – Зависимости элементов собственных векторов напряжения от  $T$  для  $\tau_1$  (а),  $\tau_2$  (б) и  $\tau_3$  (в)

На рисунке 4.27 представлены временные отклики при изменении  $T$ . С увеличением  $T$  амплитуда импульса 1 незначительно увеличивается с 1,62 В до 1,64 В, а импульса 2 – с 0,70 В до 0,72 В. Таким образом, влияние  $T$  на временной отклик мало по амплитуде. Между тем по задержкам оно существенно. В результате разность задержек составила 0,37 нс при  $T = -50$  °С и 0,29 нс при  $T = 150$  °С, т.е. уменьшилась на 22%.

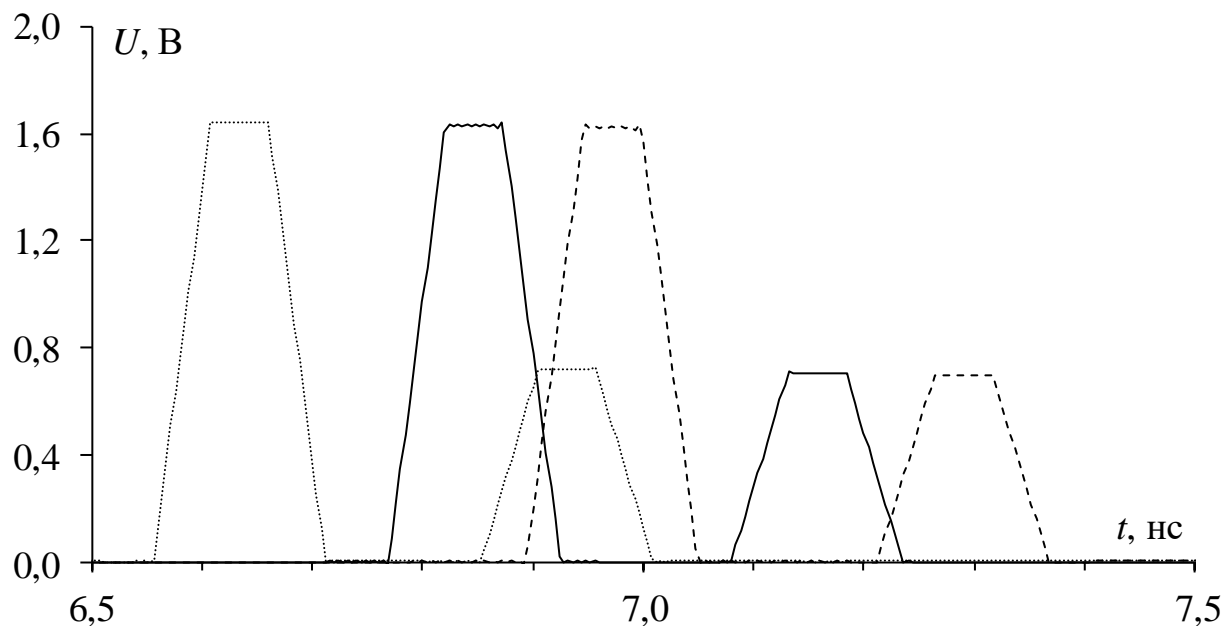


Рисунок 4.27 – Формы напряжения на выходе при  $T = -50$  (· · ·), 25 (—), 150 (— —) °С

### 4.3 Основные результаты раздела и выводы

Впервые представлены систематизированные результаты исследования влияния температуры на параметры и значения  $\tau$  и  $Z$ , на собственные значения и векторы, а также временные отклики модифицированных МПЛ. По результатам видно, что основное влияние температура оказывает на относительную диэлектрическую проницаемость. Так, при одновременном влиянии температуры на все параметры линии, показано, что поведение зависимостей  $\tau$  и  $Z$  остается прежним, однако их значения могут существенно измениться до 3%. Касательно представленных результатов влияния температуры на собственные значения и

векторы, а также временные отклики без учета потерь, показано, что из-за влияния температуры на относительную диэлектрическую проницаемость 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:

1. Ввод начальной и конечной температур и шага изменения температуры.
2. Ввод температурных коэффициентов параметров.
3. Задание температурной модели.
4. Выполнение оценки влияния заземления дополнительных проводников на характеристики МПЛ.



## 5. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Здесь представлено подтверждение достоверности результатов, полученных в разделах 2–4 [55, 56].

### 5.1 Сравнение характеристик экранированной микрополосковой линии, полученных разными методами и программами

Для проверки достоверности результатов раздела 2 выполнены дополнительные вычисления в трех различных программах для экранированной МПЛ. Результаты для  $\tau$  и  $Z$ , полученные в программах FasterCap (основана на МоМ), а также FEMM и FEM2D (основаны на МКЭ), представлены на рисунках 5.1–5.3, соответственно.

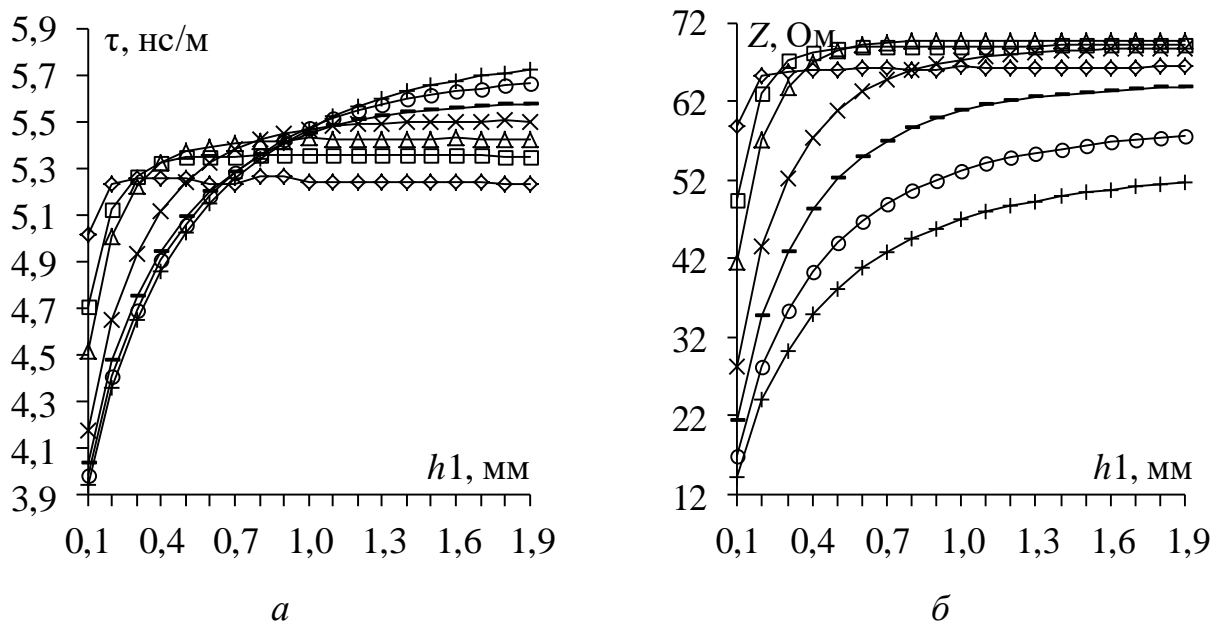


Рисунок 5.1 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h_1$ , полученные в FasterCap

при  $w=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,6$  ( $\times$ ),  $0,9$  ( $\ominus$ ),  $1,2$  ( $\circ$ ),  $1,5$  ( $+$ ) мм

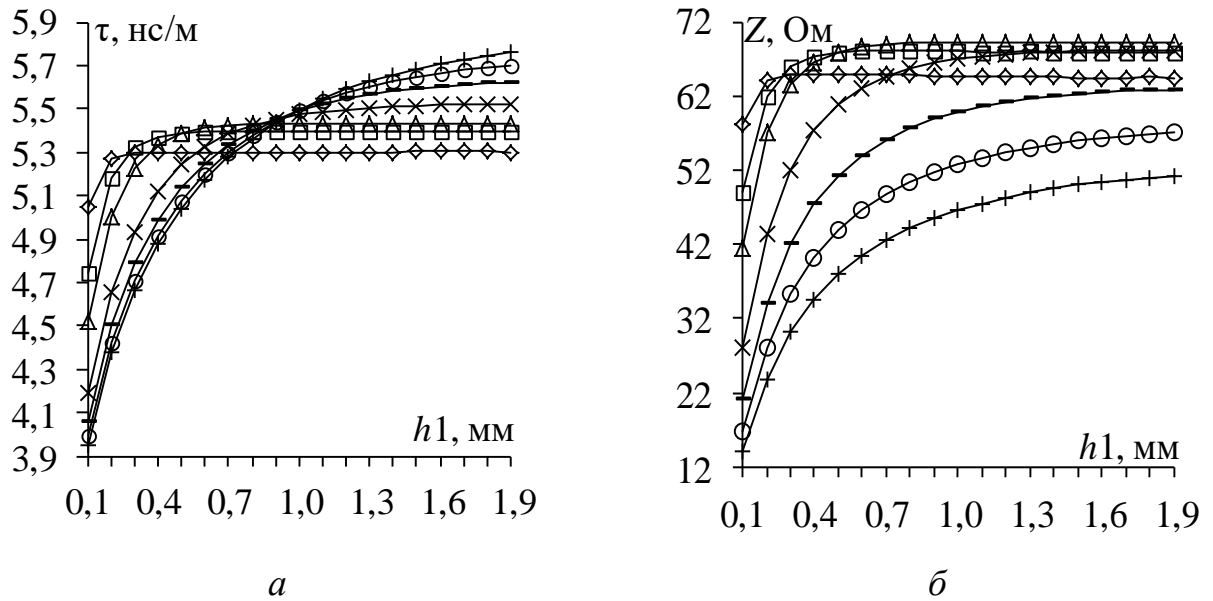


Рисунок 5.2 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h1$ , полученные в FEMM

при  $w=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,6$  ( $\times$ ),  $0,9$  ( $\ominus$ ),  $1,2$  ( $\circ$ ),  $1,5$  ( $+$ ) мм

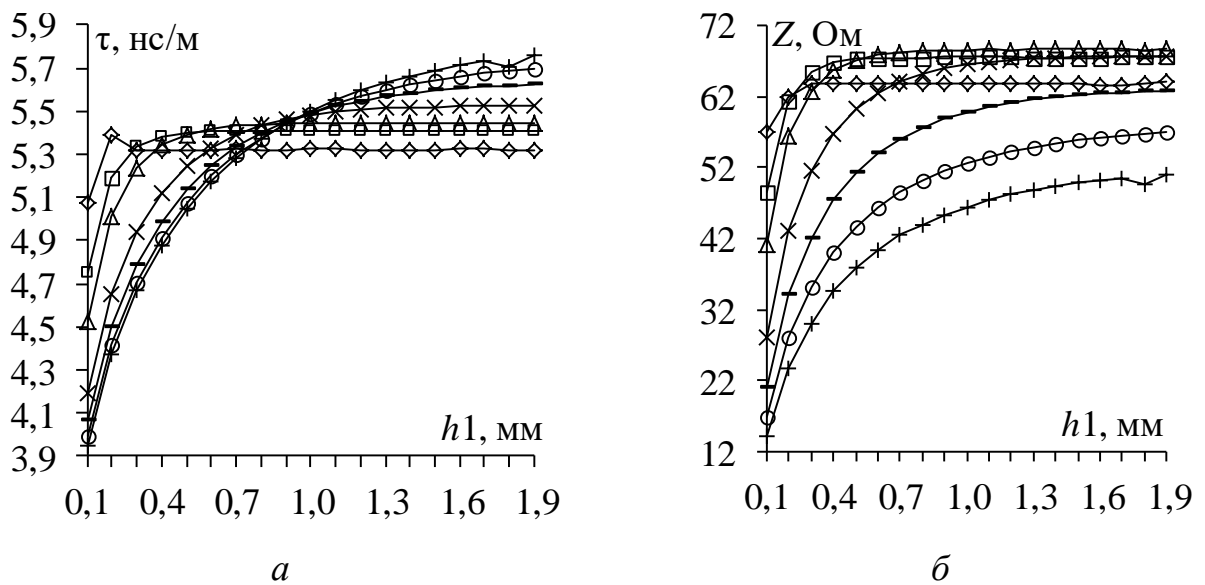


Рисунок 5.3 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h1$ , полученные в FEM2D

при  $w=0,1$  ( $\diamond$ ),  $0,2$  ( $\square$ ),  $0,3$  ( $\Delta$ ),  $0,6$  ( $\times$ ),  $0,9$  ( $\ominus$ ),  $1,2$  ( $\circ$ ),  $1,5$  ( $+$ ) мм

По вычисленным результатам (рисунки 5.1–5.3) видно, что все зависимости  $\tau$  и  $Z$  ведут себя аналогичным образом, как на рисунке 2.5. Однако при  $w=0,1$  мм наблюдаются слабые изменения при вычислениях в FasterCap и FEMM, а при  $h1=0,2$  мм и  $w=0,1$  мм в методе FEM2D изменения выражены сильнее. Поэтому на рисунке 5.4 представлено сравнение для всех методов при  $w=0,1$  мм. Видно, что при  $h1=0,2$  мм отклонение значения  $\tau$  для FEM2D от TALGAT наибольшее, но

оно составляет лишь 2%. Зависимости  $Z$  для FasterCap и FEM2D имеют более выраженные отклонения, но они также в пределах 2%. Значения  $\tau$  и  $Z$  при расчетах в программах TALGAT и FasterCap очень близки, что объяснимо тем, что обе программы основаны на MoM.

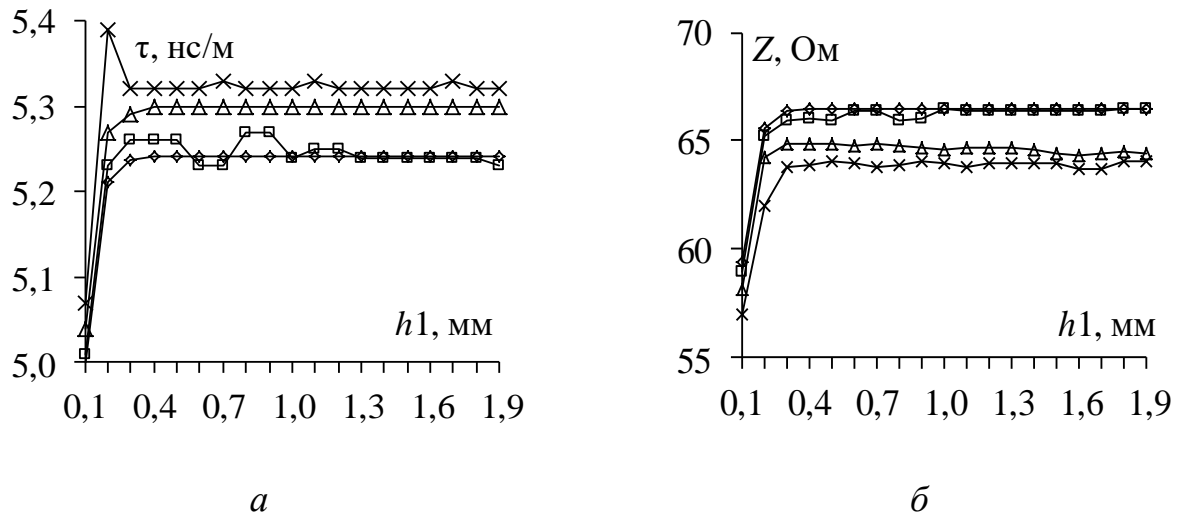


Рисунок 5.4 – Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $h1$  при  $w=0,1$  мм  
для TALGAT ( $\diamond$ ), FasterCap ( $\square$ ), FEMM ( $\Delta$ ), FEM2D ( $\times$ )

На рисунке 5.5 представлена сравнительная оценка  $L$  и  $C$  для программ при  $w=0,1$  мм. Как видно, все зависимости  $L$  и  $C$  имеют широкий участок со слабым изменением значения. Отклонение значений от TALGAT составляет менее 1%.

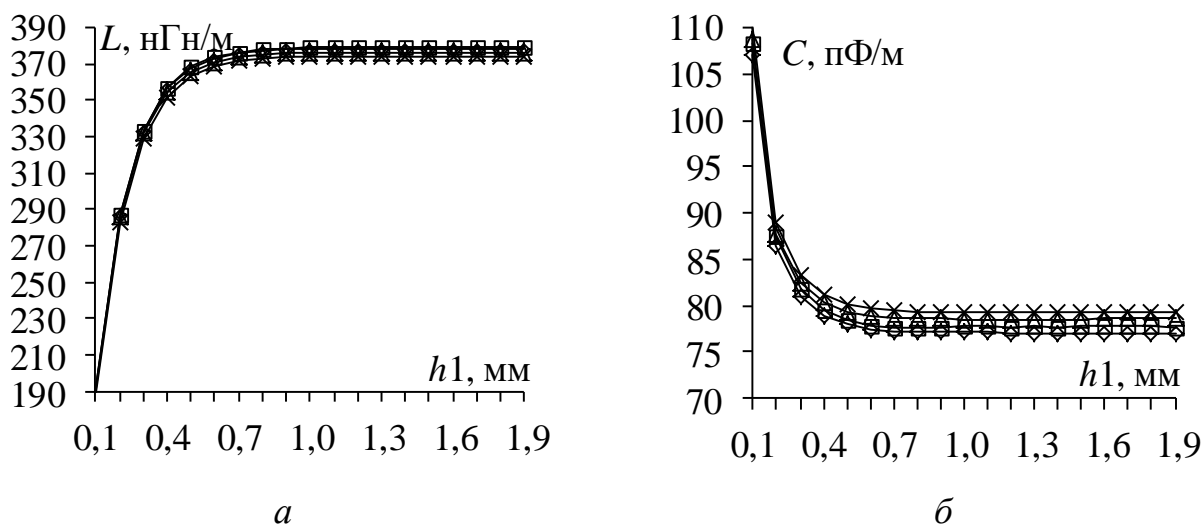


Рисунок 5.5 – Зависимости  $L$  (а) и  $C$  (б) от  $h_1$  при  $w=0,1$  мм  
для TALGAT ( $\diamond$ ), FasterCAP ( $\square$ ), FEMM ( $\Delta$ ), FEM2D ( $\times$ )

Таким образом, сравнение результатов, полученных, используя 4 программы на основе двух методов, показало близкие результаты, с отклонением менее 2%.

## 5.2 Сравнение временных откликов микрополосковой линии, покрытой заземленным проводником, полученных алгоритмической и аналитической моделями

Для проверки достоверности результатов раздела 3 выполнено сравнение временных откликов, полученных алгоритмической и аналитической моделями на примере МФ из МПЛ с одним заземленным проводником сверху. Сначала приведена аналитическая модель для такой МПЛ.

Известен аналитический подход на основе применения метода модального разложения во временной области [57–59]. С его помощью получена аналитическая математическая модель временного отклика МФ на импульсное воздействие для частного случая, когда пассивный проводник закорочен на концах. Кратко представим эту модель.

В модели используются:

– матрицы  $\mathbf{T}_V$  и  $\mathbf{T}_I$ , вычисленные из собственных векторов матриц  $\mathbf{LC}$  и  $\mathbf{CL}$  как

$$\mathbf{T}_V = \begin{bmatrix} T_{Vc,1} & T_{Vd,1} \\ T_{Vc,2} & T_{Vd,2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_I = \begin{bmatrix} T_{Ic,1} & T_{Id,1} \\ T_{Ic,2} & T_{Id,2} \end{bmatrix}; \quad (5.1)$$

– матрица модальных импедансов

$$\mathbf{R}_{Sm} = \frac{R}{(T_{Vc,1}T_{Vd,2} - T_{Vc,2}T_{Vd,1})} = \begin{bmatrix} T_{Vd,2}T_{Ic,1} & T_{Vd,2}T_{Id,1} \\ -T_{Vc,2}T_{Ic,1} & -T_{Vc,2}T_{Id,1} \end{bmatrix}; \quad (5.2)$$

– коэффициенты отражения мод

$$\mathbf{\Gamma}_m = (\mathbf{R}_m \mathbf{Z}_{cm}^{-1} + \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{R}_m \mathbf{Z}_{cm}^{-1} - \mathbf{E}) = \begin{bmatrix} \Gamma_{cc} & \Gamma_{cd} \\ \Gamma_{dc} & \Gamma_{dd} \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

где  $\mathbf{E}$  – единичная матрица, а элементы матрицы характеристических импедансов мод  $\mathbf{Z}_{cm}$  определяются как

$$Z_{cmi} = \sqrt{\frac{L_{mi}}{C_{mi}}}, \quad i = 1, 2, \quad (5.4)$$

где  $L_{mi}$  и  $C_{mi}$  – элементы диагонализированных матриц погонных коэффициентов электромагнитной и электростатической индукции соответственно.

На основе (5.1)–(5.4) получена аналитическая модель временного отклика на выходе линии, учитывающая компоненты падающей волны:

$$V(t) = T_{Vc,1} \left[ (1 + \Gamma_{cc}) V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{cd} V_{0d}(t - T_d) \right] + T_{Vd,1} \left[ (1 + \Gamma_{dd}) V_{0d}(t - T_d) + \Gamma_{dc} V_{0c}(t - T_c) \right], \quad (5.5)$$

где  $V_{0c}$ ,  $V_{0d}$  – векторы источника синфазной и дифференциальной мод;  $T_c$ ,  $T_d$  – времена распространения синфазной и дифференциальной мод,  $T_{Vc,1}$ ,  $T_{Vc,2}$  и  $T_{Vd,1}$ ,  $T_{Vd,2}$  – коэффициенты матрицы преобразования синфазной и дифференциальной мод соответственно.

Исходные векторы первоначально падающих мод определяются как

$$\mathbf{V}_{0m}(t) = (\mathbf{E} + \mathbf{R}_m \mathbf{Z}_{cm}^{-1})^{-1} \mathbf{V}_m(t) = \begin{bmatrix} V_{0c}(t) \\ V_{0d}(t) \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

где  $\mathbf{V}_m(t)$  – матрица модальных источников

$$\mathbf{V}_m(t) = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} V_c(t) \\ V_d(t) \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

где  $\mathbf{V}(t)$  – матрица источников напряжения

$$\mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} V_{in}(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5.8)$$

где  $V_{in}(t)$  – форма ЭДС источника.

Для заданных значений параметров МФ из 3.4 аналитическая модель для отклика на выходе активного проводника

$$V = 0,778[0,576V_{0c}(t - T_c) - 0,905V_{0d}(t - T_d)] - 0,005[0,569V_{0d}(t - T_d) - 0,362V_{0c}(t - T_c)]. \quad (5.9)$$

Результаты, для  $l=1$  м, полученные ранее по алгоритмической модели в подразделе 3.4 и аналитически по (5.9), представлены на рисунке 5.6, а амплитуды и задержки импульсов на выходе МФ сведены в таблицу 5.1.

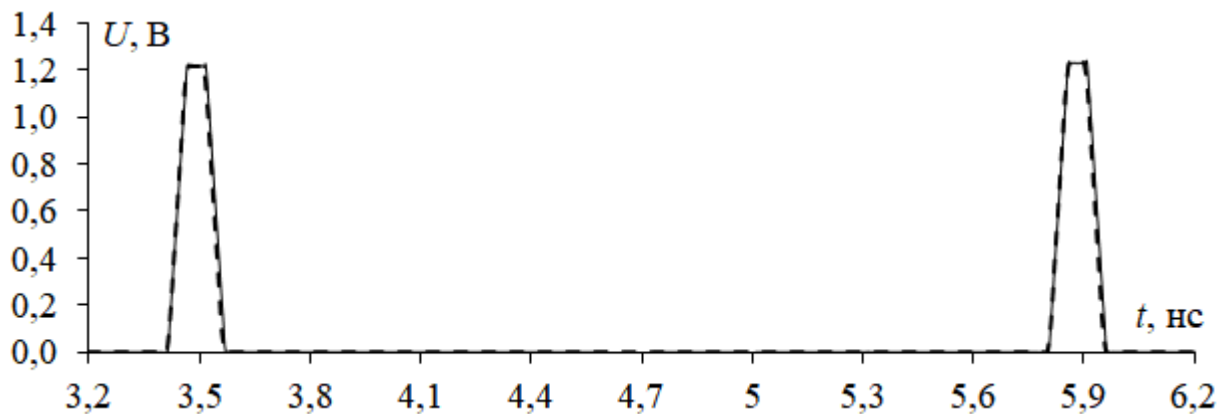


Рисунок 5.6 – Формы напряжения на выходе МФ с пассивным проводником сверху, вычисленные по алгоритмической и аналитической моделям

Таблица 5.1 – Амплитуды ( $U_i$ ) и задержки импульсов на выходе МФ, вычисленные по алгоритмической и аналитической моделям

Параметры	Алгоритмическая модель	Аналитическая модель
$U_1, U_2, В$	1,21	1,21
$T_d, нс$	3,414	3,414
$T_c, нс$	5,805	5,805

Из рисунка 5.6 и таблицы 5.1 видно, что формы напряжений импульсов совпадают по задержке, амплитуде и полярности. Таким образом, достоверность полученных результатов для данного МФ подтверждена аналитической моделью.

### 5.3 Экспериментальные исследования микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками

Здесь представлено подтверждение достоверности результатов 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.

#### 5.3.1 Разработка макетов

Исходная конфигурация представлена в разделе 3 (рисунок 3.119). Её реализация с прежними параметрами затруднительна. Поэтому для данной линии в ходе предварительного моделирования выбраны геометрические параметры (рисунок 5.7), позволяющие получить импульсы с равными амплитудами и легче изготовить макеты. С учетом разброса параметров при изготовлении, взяты два близких значения разноса проводников ( $s$ ). Кроме того, взяты два значения длины ( $l$ ), чтобы гарантированно разложить импульс. Для возможности будущих измерений в климатической экранированной ТЕМ-камере макеты изготовлены в виде стандартной платы размерами  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>. Использовался отечественный материал марки СТФ-2-105-0,5. Все параметры сведены в таблицу 5.2.

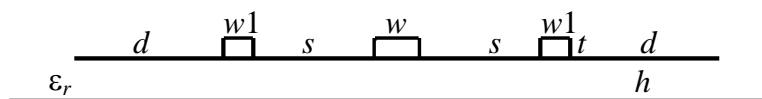


Рисунок 5.7 – Поперечное сечение МПЛ макетов

Таблица 5.2 – Параметры МПЛ макетов

№	$h$ , мм	$t$ , мм	$d$ , мм	$w$ , мм	$w1$ , мм	$s$ , мм	$\epsilon_r$	$tg\delta$	$l$ , м
1	0,5	0,105	1	0,45	0,2	0,44	5,4	0,035	0,07
2	0,5	0,105	1	0,45	0,2	0,45	5,4	0,035	0,328

Внутренние сопротивления источника СКИ и нагрузки  $R1=R2=50$  Ом (в соответствии с измерительным трактом). У источника СКИ амплитуда ЭДС 2 В, времена нарастания, плоской вершины и спада по 20 пс для макета 1, а 5 В и 50 пс для макета 2.

Выполнено моделирование в системе TALGAT с учетом потерь и без него. Вычислены формы напряжения на входе и выходе (рисунки 5.8 и 5.9). Как видно, СКИ разлагается на импульсы. Поскольку боковые заземленные проводники симметричны и имеют одинаковую ширину  $w1=0,2$  мм, амплитуда импульса самой быстрой из трёх мод близка к нулю, и СКИ разлагается не на 3, а на 2 импульса.

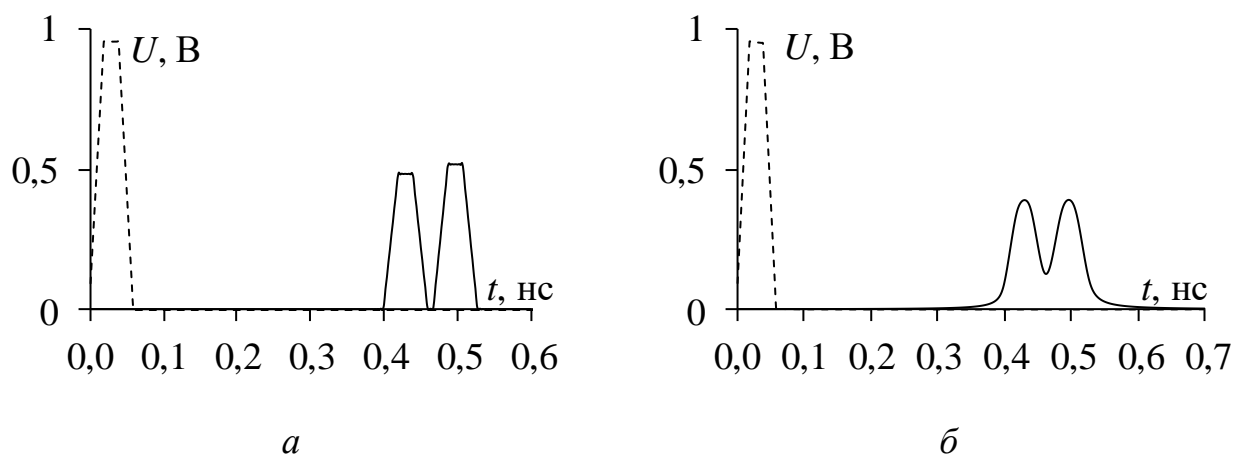


Рисунок 5.8 – Вычисленные формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) макета 1 для случаев без потерь (а) и с потерями (б)



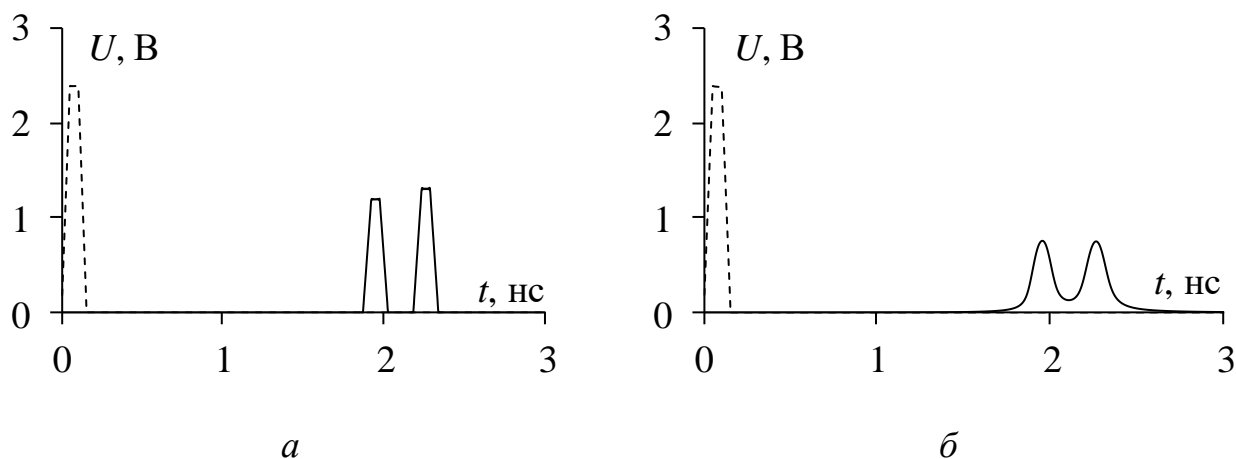
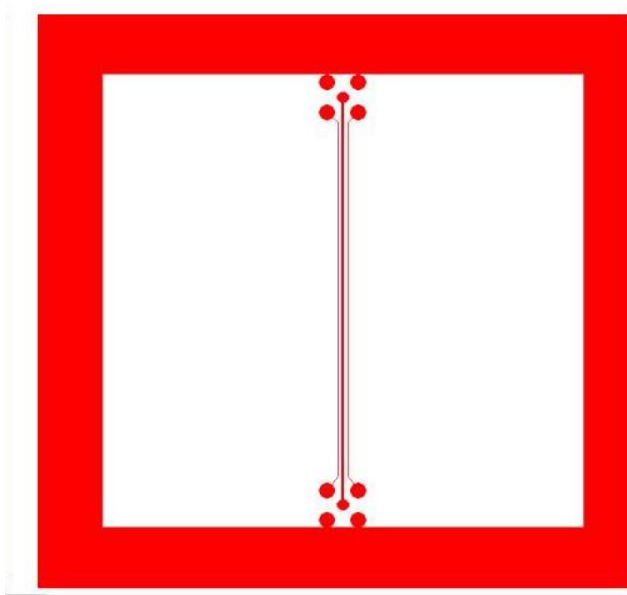
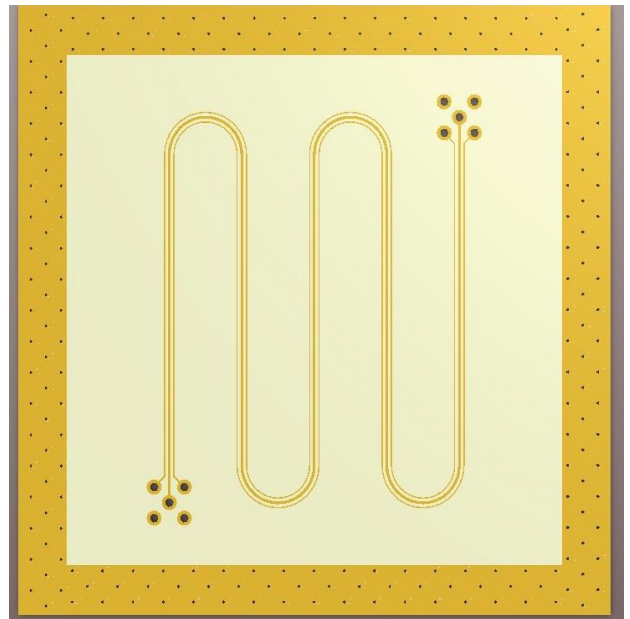
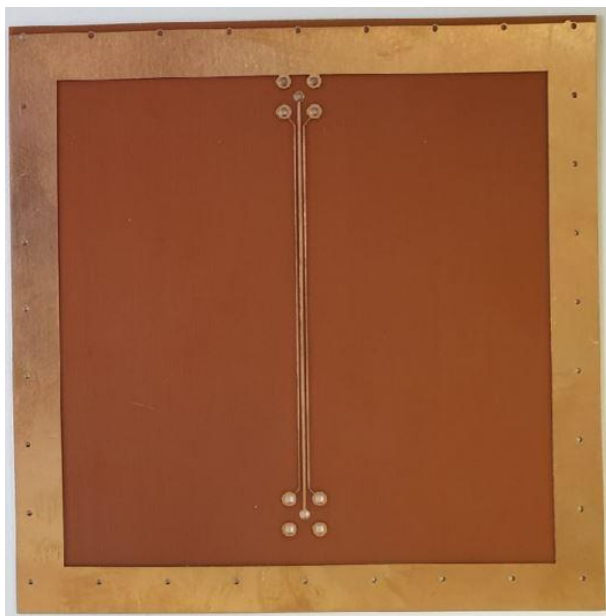
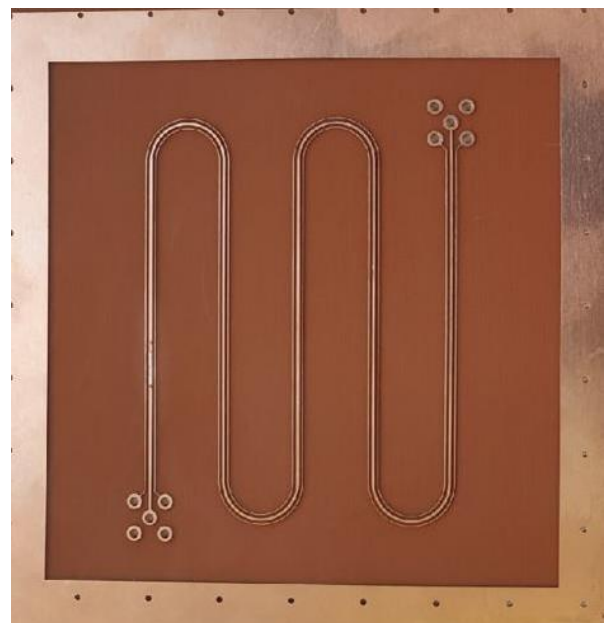


Рисунок 5.9 – Вычисленные формы напряжения на входе (---) и выходе (—) макета 2 для случаев без потерь (а) и с потерями (б)

Анализ рисунка 5.8 показывает, что амплитуды импульсов выравнены в случае с учетом потерь и составляют 0,39 В, а без него амплитуда второго импульса увеличена на 0,03 В, при этом разность их задержек 0,07 нс. Анализ рисунка 5.9 показывает, что амплитуды импульсов выравнены в случае с учетом потерь и составляют 0,7 В, а без него амплитуда второго импульса увеличена на 0,09 В, но при этом разность их задержек 0,3 нс. Таким образом, выбор параметров линии таким, что амплитуда второго импульса заведомо больше без учета потерь, позволяет получить равные амплитуды импульсов при учете потерь, за счет большего влияния диэлектрических потерь и дисперсии на второй импульс. Можно предположить, что это равенство амплитуд сохранится и при измерениях.

На основе полученных результатов разработаны (рисунок 5.10) и изготовлены (рисунок 5.11) макеты.

*a**б*Рисунок 5.10 – Фотошаблоны верхнего слоя для макетов 1 (*a*) и 2 (*б*)*a**б*Рисунок 5.11 – Фото макетов 1 (*a*) и 2 (*б*)

После изготовления макетов проведены контрольные измерения геометрических параметров с помощью измерительной лупы КОМЗ ЛИ-3-10х (рисунок 5.12 *a*) и электронного (цифрового) микрометра IP 65 COOLANT PROOF Mitutoyo (рисунок 5.12 *б*). По нормативным документам на материал СТФ-2-105-0,5 взято  $\epsilon_r=4,7$  и  $tg\delta=0,030$  [60]. Измерены реальные геометрические

параметры, средние значения которых составили: для обоих макетов  $h=0,5$  мм,  $t=105$  мкм,  $w=0,45$  мм,  $w_1=0,2$  мм,  $s=0,5$  мм, а также  $l=61$  мм для макета 1 и  $l=32,9$  см для макета 2.



а



б

Рисунок 5.12 – Измерительная лупа (а) и электронный микрометр (б)

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 5.13), подключавшегося к макетам через SMA соединители. Затем по измеренным данным  $S$ -параметров в системе ADS для получения временных откликов подавались (рисунок 5.14) входные импульсы с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 40 и 50 пс (рисунок 5.15) с ЭДС по 1 В. Также для двух макетов во временной и частотной областях выполнено квазистатическое моделирование в системе TALGAT.



Рисунок 5.13 – Фото макета и векторного анализатора цепей Р4М-40

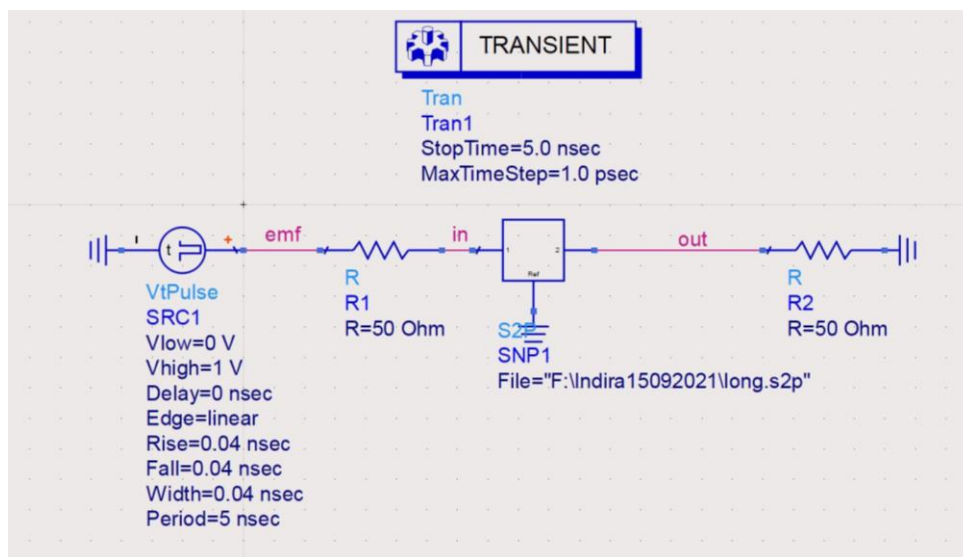


Рисунок 5.14 – Схема для моделирования в системе ADS

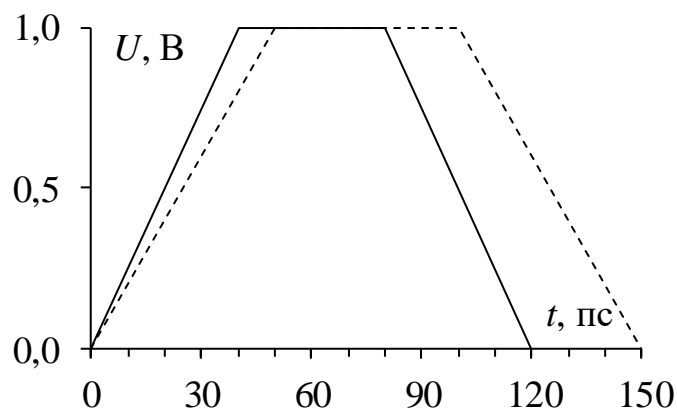


Рисунок 5.15 – ЭДС воздействия с параметрами по 40 (—) и 50 (- -) пс

### 5.3.2 Экспериментальные исследования во временной области

На рисунке 5.16 показаны результаты эксперимента и моделирования во временной области для макета 1. Видно, что 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 5.16 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

учёт задержек в ответвлениях, соединителях и переходах. Кроме того, значение  $\epsilon_r$  при моделировании могло оказаться больше реального. Наконец, измерения имеют свою погрешность.

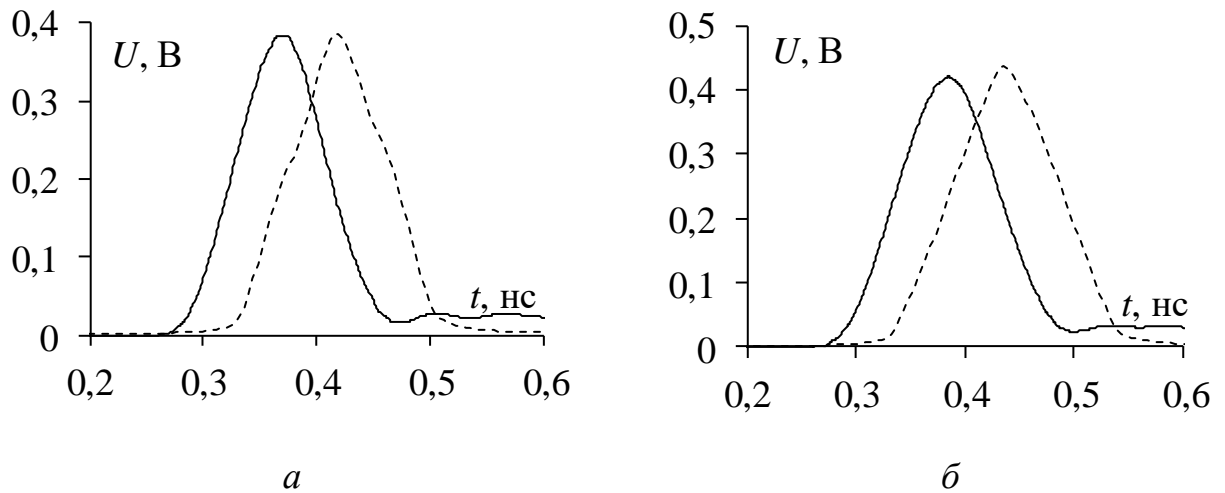


Рисунок 5.16 – Формы напряжения на выходе макета 1, полученные при моделировании (---) и эксперименте (—) при входных импульсах с параметрами по 40 (а) и 50 (б) пс

На рисунке 5.17 показаны результаты эксперимента и моделирования во временной области для макета 2. Видно, что СКИ разложился на 2 импульса, как и предполагалось при предварительном моделировании. При этом, амплитуда второго импульса несколько выше, чем амплитуда первого, что может быть вызвано наложением фронта второго импульса на спад первого, из-за неполного разложения. Это становится менее выраженным 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, видно, что при моделировании разность задержек импульсов больше, чем при эксперименте (хотя её и трудно оценить точно из-за неполного разложения), что подтверждает сделанное предположение о том, что значение  $\epsilon_r$  при моделировании больше реального.

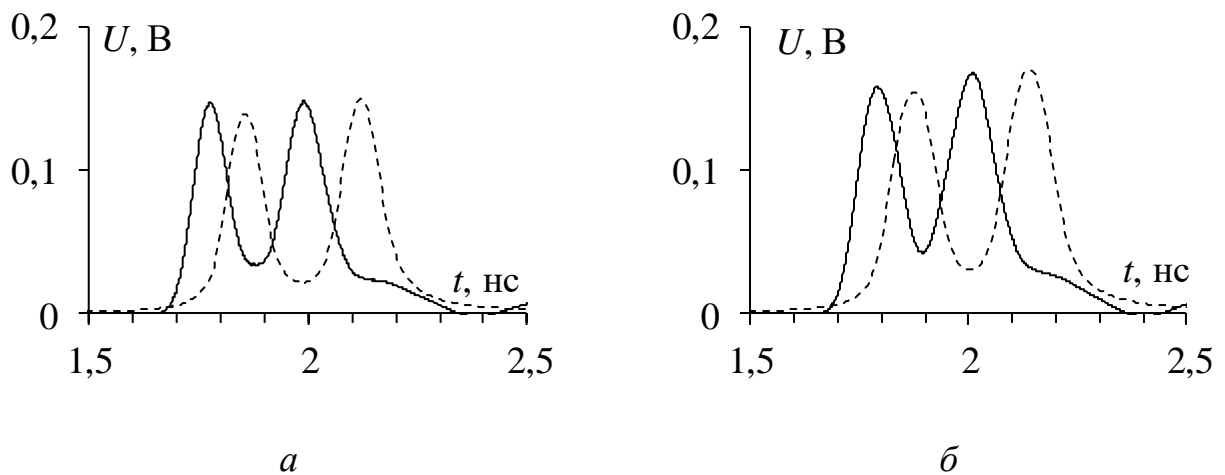


Рисунок 5.17 – Формы напряжения на выходе макета 2, полученные при моделировании (---) и эксперименте (—) при входных импульсах с параметрами по 40 (а) и 50 (б) пс

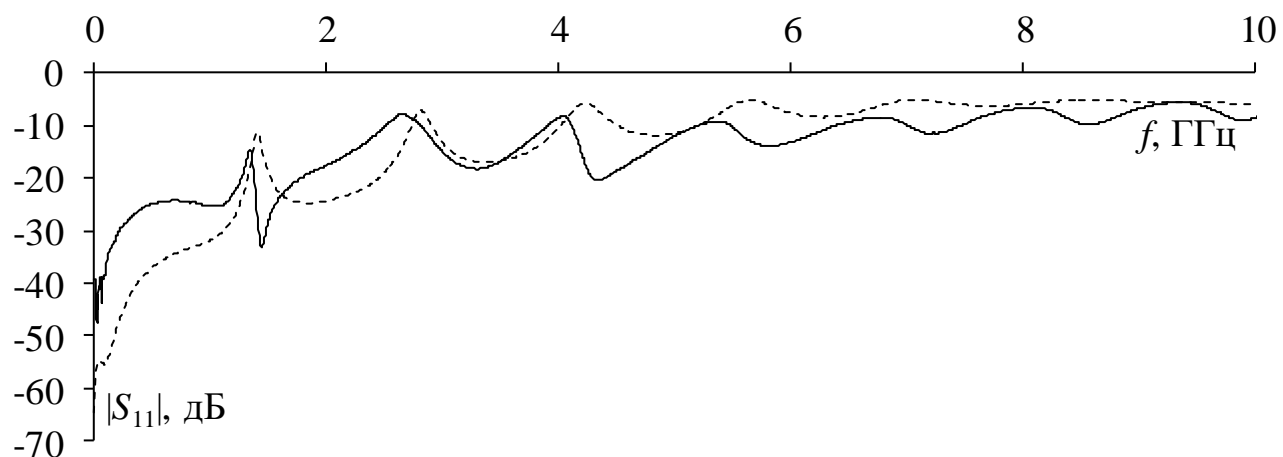
Таким образом, представлены результаты моделирования и эксперимента во временной области для двух макетов с различием задержек  $\pm 8\%$  и  $\pm 1,5\%$ . Для макета 1 СКИ не разложился на импульсы, так как длина линии 61 мм мала, а в макете 2 с увеличенной длиной до 329 мм СКИ разложился на 2 импульса.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

### 5.3.3 Экспериментальные исследования в частотной области

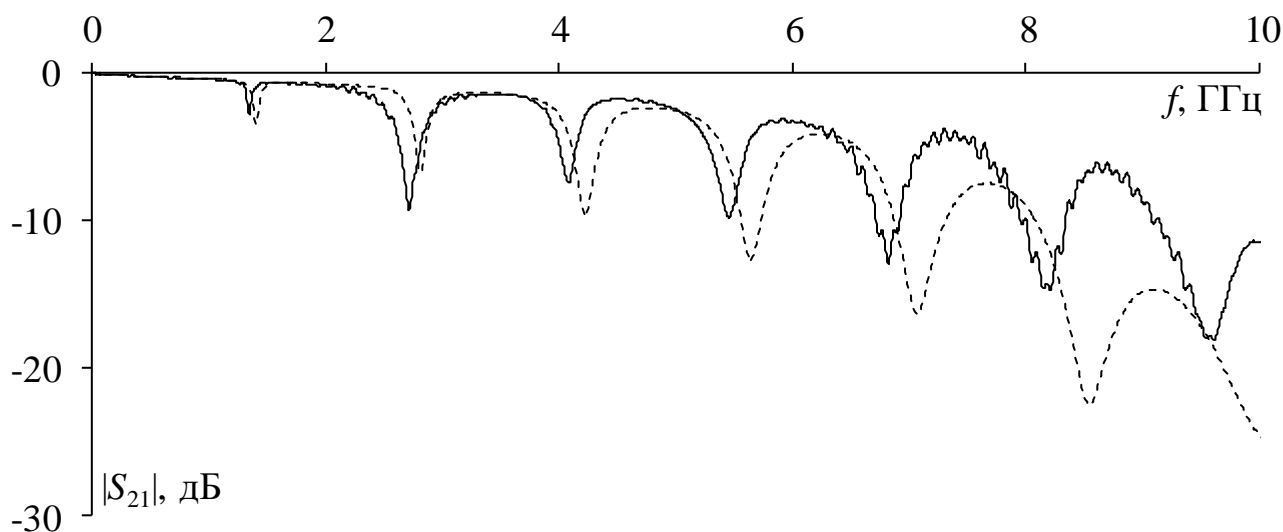
Аналогично исследованиям во временной области выполнены экспериментальные исследования в частотной области для двух макетов. На рисунке 5.18 представлены измеренные и вычисленные частотные зависимости модулей коэффициентов отражения  $|S_{11}|$  и передачи  $|S_{21}|$  в диапазоне частот до 10 ГГц для макета 1. Видно, что результаты моделирования и эксперимента хорошо согласуются между собой, при этом среднее отклонение составляет 3,67 дБ.



Из рисунка 5.18 б видно, что результаты хорошо согласуются по характеру зависимостей. Частота первого резонанса  $f_1$  составляет по результатам моделирования 1,3 ГГц ( $-3,50$  дБ), а эксперимента – 1,2 ГГц ( $-2,42$  дБ). Нарастающий сдвиг последующих значений резонансов может быть связан с различием принятого при моделировании и реальных значений диэлектрической проницаемости, а также её частотной зависимостью.



*a*



*б*

Рисунок 5.18 – Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (*a*) и  $|S_{21}|$  (*б*) для макета 1, полученные при моделировании (---) и эксперименте (—)

На рисунке 5.19 приведены аналогичные результаты для макета 2. Видно, что до 6 ГГц результаты моделирования и эксперимента, в целом, хорошо согласуются между собой.



Из рисунка 5.19 б следует, что полоса пропускания макета 2 по уровню – 3 дБ ( $\Delta f$ ) по результатам моделирования составляет 0,46 ГГц, а эксперимента – 0,45 ГГц. Зависимости хорошо согласуются до 5 ГГц. Частоты первого резонанса  $f_1$  для моделирования и эксперимента совпадают и составляют 0,25 ГГц (–1,73 дБ). Рассогласованность результатов на высоких частотах может быть связана с неучтённой частотной зависимостью параметров SMA соединителей и коаксиальных переходов, а также различием принятых при моделировании и реальных значений и частотной зависимости диэлектрической проницаемости.

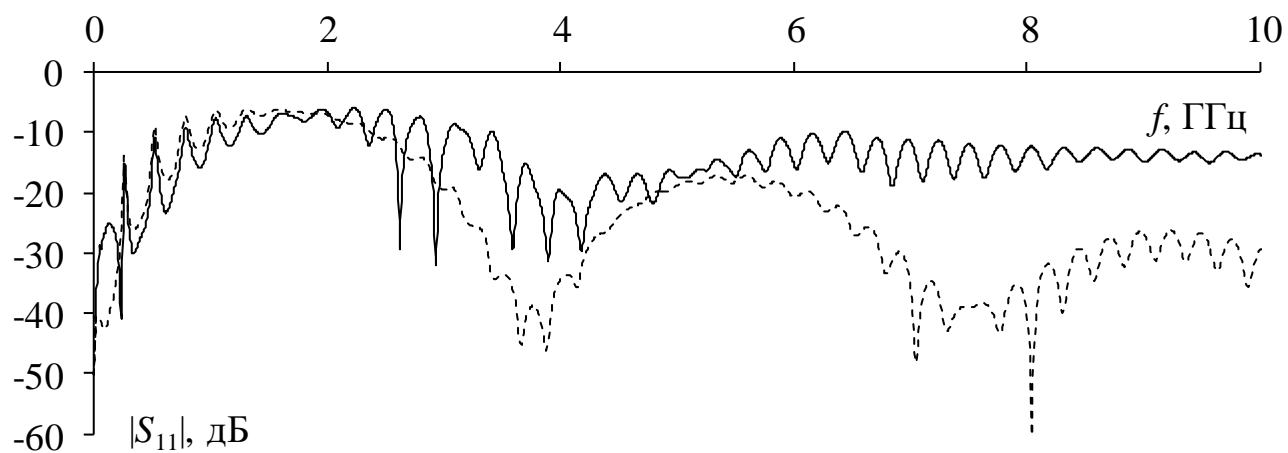
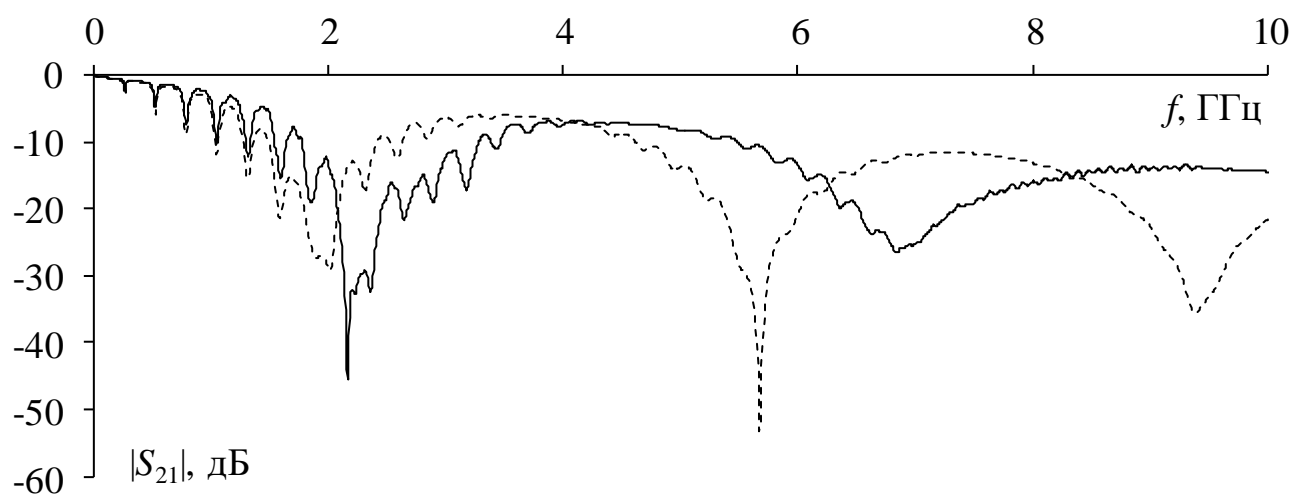
*a**б*

Рисунок 5.19 – Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (*a*) и  $|S_{21}|$  (*б*) для макета 2, полученные при моделировании (---) и эксперименте (—)

Таким образом, представлены результаты моделирования и эксперимента для двух макетов в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц. Получена хорошая согласованность результатов вычисления полосы пропускания и приемлемая для частоты первого резонанса. Различия вызваны неточным учетом частотной зависимости диэлектрической проницаемости при моделировании с учетом потерь в диэлектрике, а также неучетом влияния SMA соединителей.

#### **5.4 Экспериментальные исследования микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками при изменении температуры**

Здесь представлено подтверждение достоверности результатов раздела 4. Оно выполнено на основе сравнения результатов измерения и моделирования для макета МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками при изменении температуры. Результаты представлены только для макета 2 и входного импульса с параметрами по 40 пс, поскольку при этом достигнуто разложение с равными амплитудами (по результатам пункта 5.3.2).

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. ВАЦ соединялся с SMA соединителями измерительными кабелями Rohde Schwarz ZV-Z195 и Semflex 60637 (рисунок 5.20).

Преобразование измеренных  $S$ -параметров во временную область выполнено в системе ADS. В качестве воздействия подан входной импульс с параметрами по 40 пс.

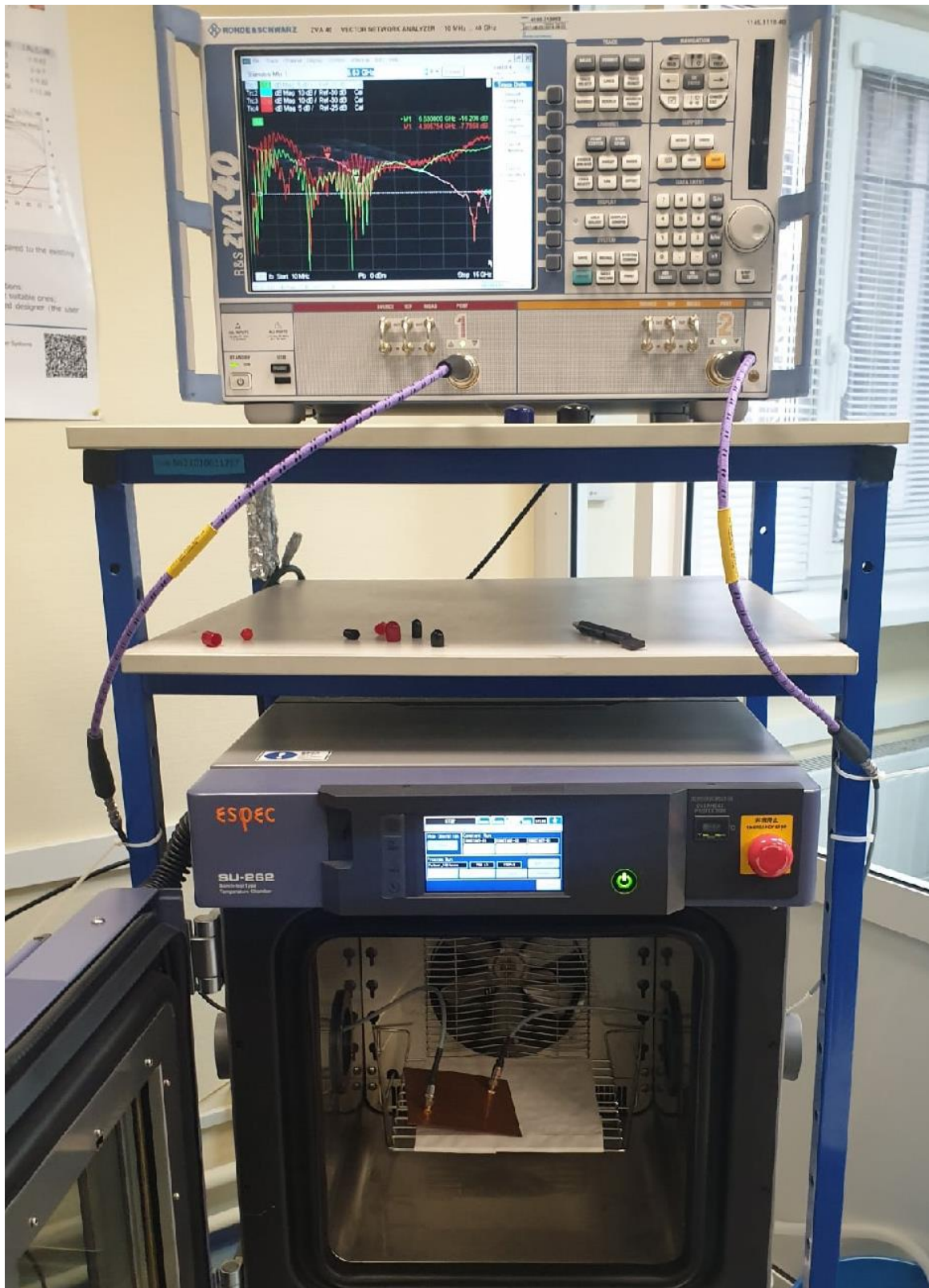


Рисунок 5.20 – Общий вид установки для измерения  $S$ -параметров макета 2 в диапазоне температур от  $-50$  до  $150$  °C

Также выполнено квазистатическое моделирование во временной и частотной областях в системе TALGAT с учетом температурной модели из пункта

1.2.5. При моделировании значения  $\alpha$  для меди приняты такими же, как в пункте 4.1.1. Для материала СТФ-2-105-0,5 с  $\epsilon_r=4,7$  принято  $\alpha=8,33 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Это значение получено с помощью дополнительного измерения  $c_{11}$  (первого элемента матрицы С) (рисунок 5.21). Оно выполнено с помощью анализатора импеданса KEYSIGHT E49990A, подключенного к макету с помощью кабелей, нагрева феном фольгированной стороны макета и измерения температуры с помощью пирометра InfraRed& K-Type Thermometer DT-8833.



Рисунок 5.21 – Измерение  $c_{11}$  при  $T= 30, 70$  и  $150 \text{ }^\circ\text{C}$

На рисунке 5.22 представлены измеренные значения  $c_{11}$  при  $T=30, 70$  и  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне частот  $f$  до 200 кГц. Согласно графикам, с увеличением  $T$  от 30 до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  значения  $c_{11}$  возрастают примерно на 10 %. Можно предположить, что  $\epsilon_{r\text{max}}$  тоже на 10% больше значения  $\epsilon_{r\text{min}}=4,7$  принятого при моделировании. Тогда,  $\epsilon_{r\text{max}}=5,17$ , а  $T_{\text{max}}=150 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{min}}=30 \text{ }^\circ\text{C}$ . По формуле (1.3) получим  $\alpha_0=3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , тогда  $\alpha=3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}/4,7=8,33 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

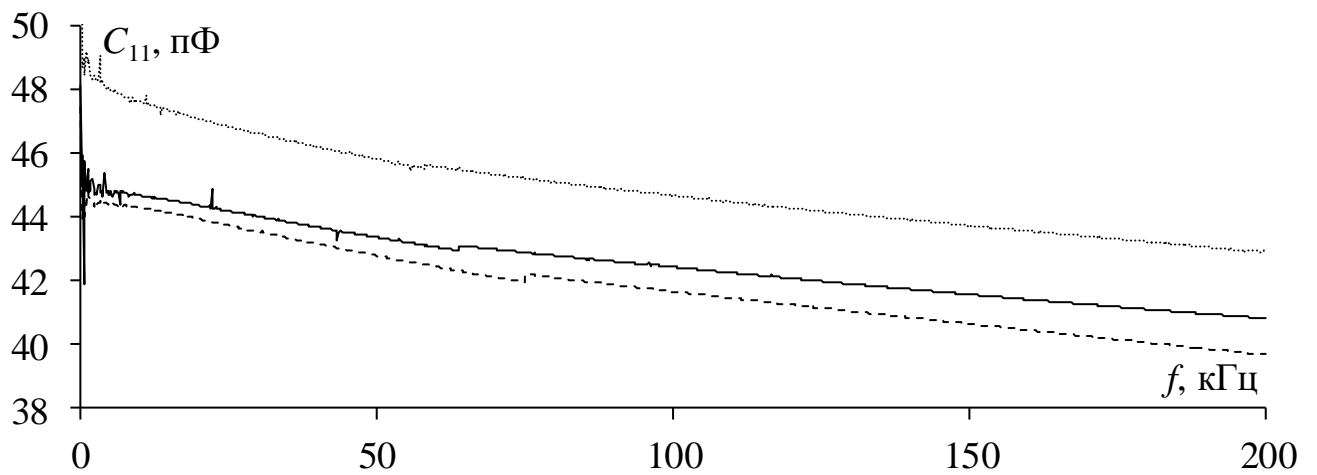
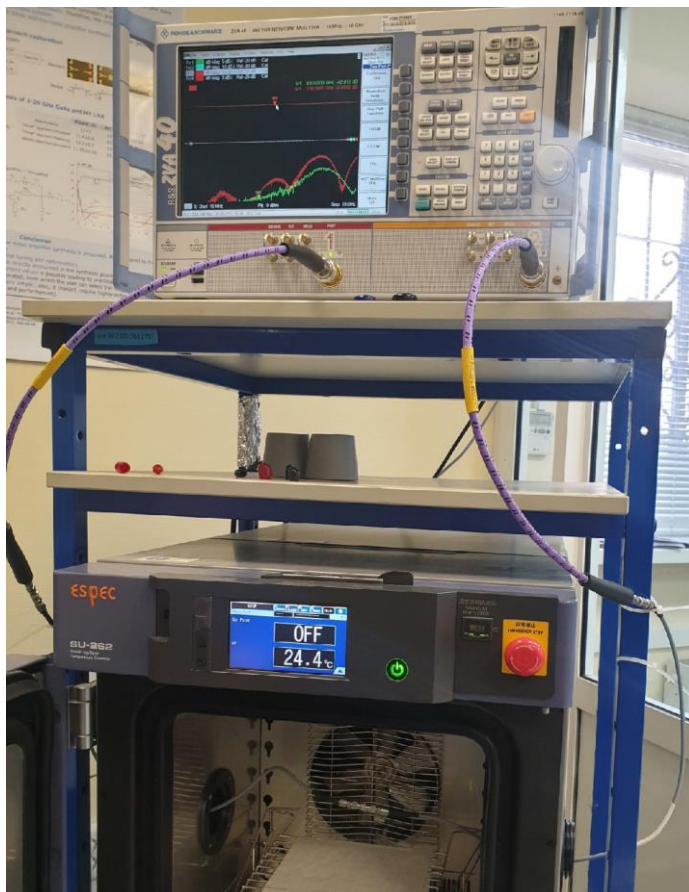


Рисунок 5.22 – Зависимости  $c_{11}$  при  $T=30$  (---),  $70$  (—),  $150$  (· · ·) °C

Дополнительно проведен эксперимент для оценки влияния  $T = -50, 25$  и  $150$  °C на измерительные кабели, соединенные между собой перемычкой TE-A-292-FF внутри ESPEC SU-262 (рисунок 5.23).



*a*



*б*

Рисунок 5.23 – Общий вид установки для измерения  $S$ -параметров перемычки в диапазоне температур от  $-50$  до  $150$  °C (*a*), фото перемычки (*б*)



### 5.4.1 Экспериментальные исследования во временной области при изменении температуры

На рисунке 5.24 представлены полученные результаты для моделирования и эксперимента при  $T = -50, 25$  и  $150$  °С. Видно, что СКИ раскладывается на 2 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 5.24 а) видно, что амплитуды импульсов значительно отличаются от результатов эксперимента. Так как известно, что с увеличением  $T$  возрастают потери, то дополнительно проведено тестовое моделирование с учетом изменения потерь в диэлектрике в 2 раза при  $T = -50$  и  $150$  °С (рисунок 5.24 б). Видно, что амплитуды импульсов уменьшились также как и при эксперименте, поскольку потери влияют на дисперсию.

Выполнена количественная оценка отклонений задержки и амплитуды напряжения импульса 1 (таблица 5.3). Она показала согласованность результатов моделирования и эксперимента, изменение задержки около 1%, а амплитуды в диапазоне 21–36%.

Таблица 5.3 – Относительные отклонения задержки и амплитуды напряжения импульса 1

Результат	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t, \%$	$\Delta U, \%$
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

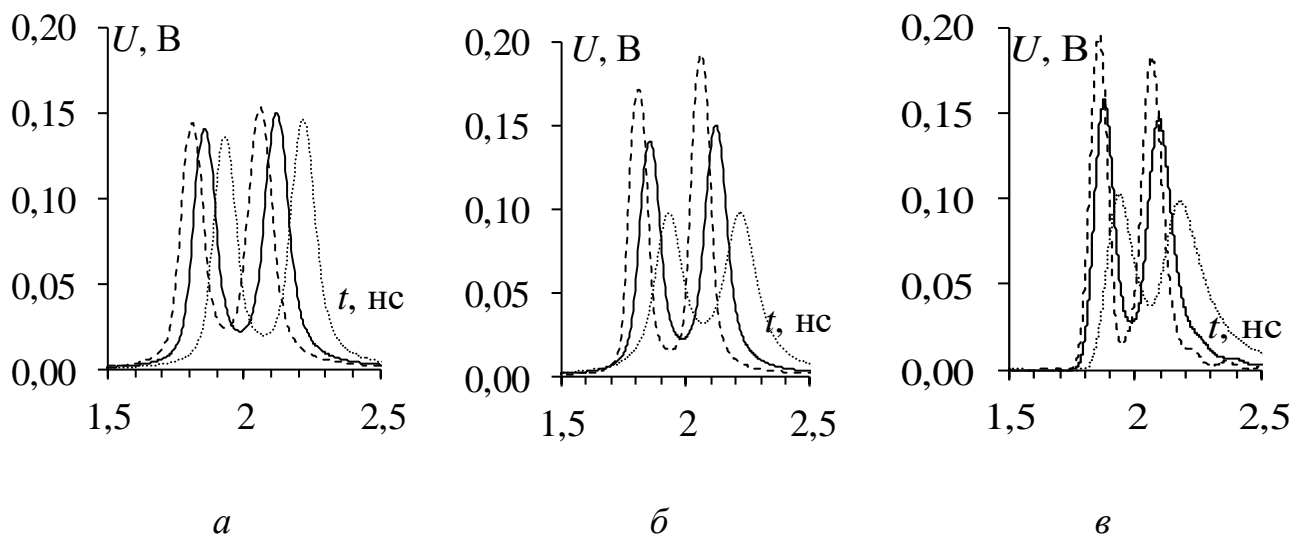


Рисунок 5.24 – Формы напряжения на выходе макета 2, полученные при моделировании без учета (*a*) и с учетом (*б*) изменения потерь в диэлектрике и эксперименте (*в*) для  $T = -50$  (---), 25 (—), 150 (· · ·) °C

Для более точного сравнения результатов моделирования и эксперимента, они представлены отдельно для  $T = -50$ , 25 и 150 °C на рисунке 5.25. Видно, хорошее совпадение результатов, с учетом изменения потерь и экспериментальных, по задержкам при всех  $T$  ( $\pm 3,55\%$  при  $T = -50$  °C,  $\pm 1,72\%$  при  $T = 25$  °C и  $\pm 2,84\%$  при  $T = 150$  °C для первого импульса). Моделирование с учетом изменения потерь в 2 раза для  $T = -50$  и 150 °C показало, что амплитуды импульсов совпали с экспериментом.



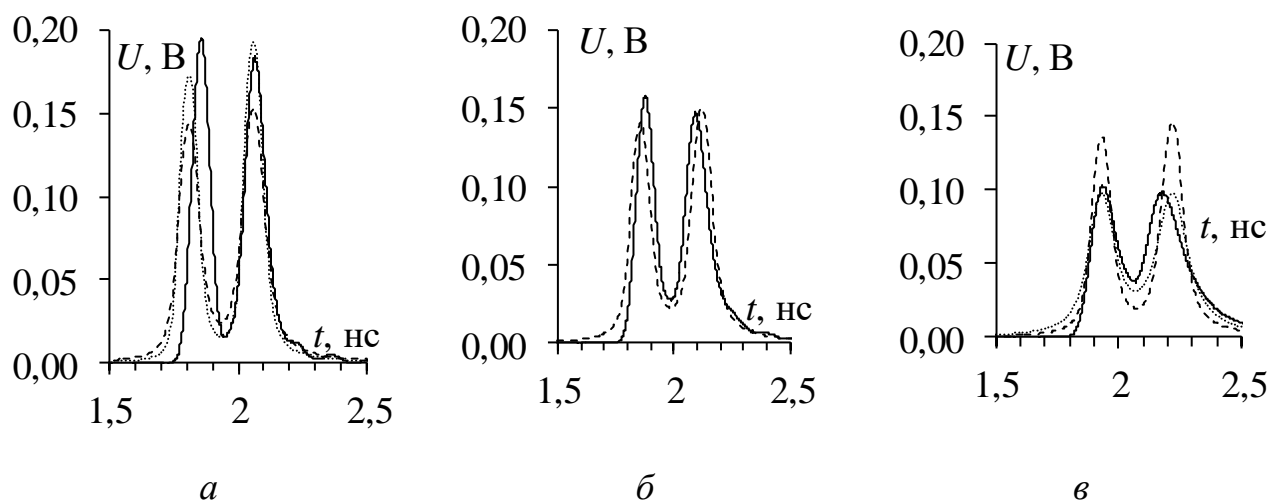


Рисунок 5.25 – Формы напряжения на выходе макета 2, полученные при моделировании без учета (---) и с учетом (· ·) изменения потерь и эксперименте (—) для  $T = -50$  (*a*),  $25$  (*б*),  $150$  (*в*) °C

Поскольку измерительные кабели также находятся внутри камеры, они могут влиять на задержку импульсов, потому что у них свой материал [61]. Поэтому выполнен эксперимент при  $T = -50$ ,  $25$  и  $150$  °C для оценки влияния на измерительные кабели, соединенные перемычкой. Из рисунка 5.26 видно, что с увеличением  $T$  задержка импульса уменьшается, а амплитуды незначительно увеличиваются. Между тем общее уменьшение задержки незначительно (менее 10 пс).

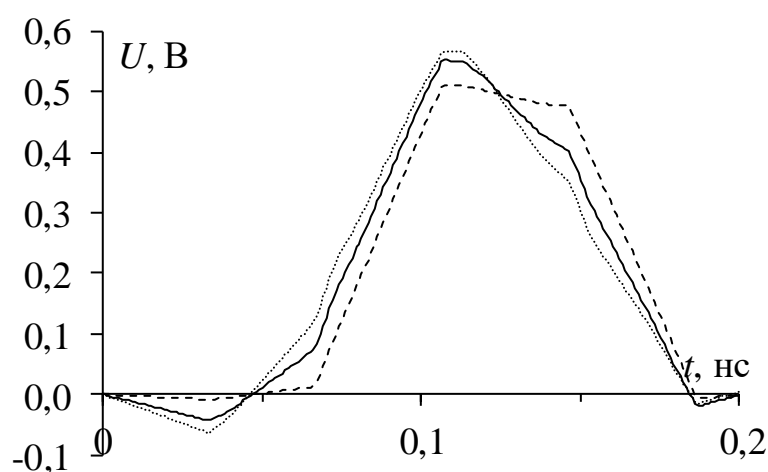


Рисунок 5.26 – Формы напряжения для перемычки с измерительными кабелями, полученные при эксперименте для  $T = -50$  (---),  $25$  (—),  $150$  (· ·) °C

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

#### **5.4.2 Экспериментальные исследования в частотной области при изменении температуры**

Аналогично исследованиям во временной области выполнены экспериментальные исследования в частотной области для макета 2 при  $T = -50$ , 25 и 150 °С в диапазоне частот от 0 до 15 ГГц. На рисунке 5.27 представлены частотные зависимости  $|S_{11}|$  для моделирования и эксперимента. Видно, что с увеличением  $T$  частотные зависимости  $|S_{11}|$  меняются значительно. Изменение потерь в диэлектрике в 2 раза при  $T = -50$  и 150 °С значительно меняет зависимости полученные без учета изменения потерь.

Для более точного сравнения результатов моделирования и эксперимента они представлены отдельно для  $T = -50$ , 25 и 150 °С на рисунке 5.28. Как видно, результаты хорошо согласуются при всех  $T$  в начале частотного диапазона. Отличия в его конце вызваны SMA соединителями.

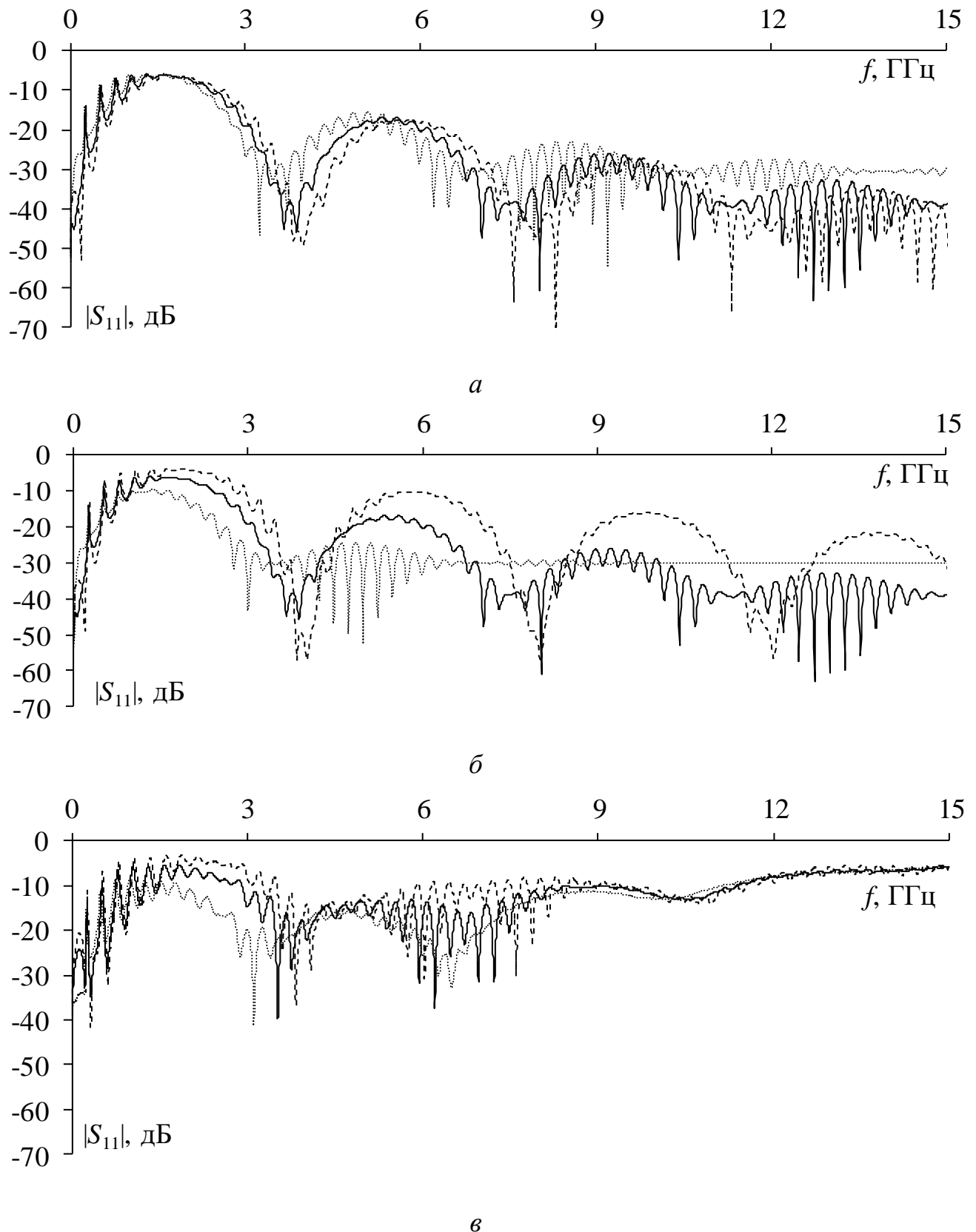


Рисунок 5.27 – Частотные зависимости  $|S_{11}|$  для макета 2, полученные при моделировании без учета (*a*), с учетом (*б*) изменения потерь и эксперименте (*в*) для  $T = -50$  (---),  $25$  (—),  $150$  (· · ·) °C

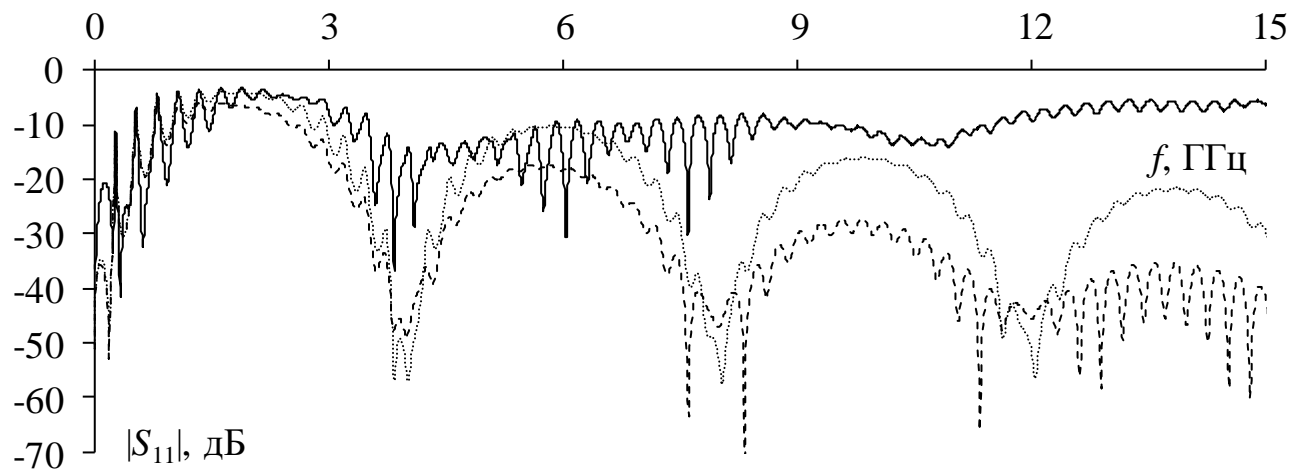
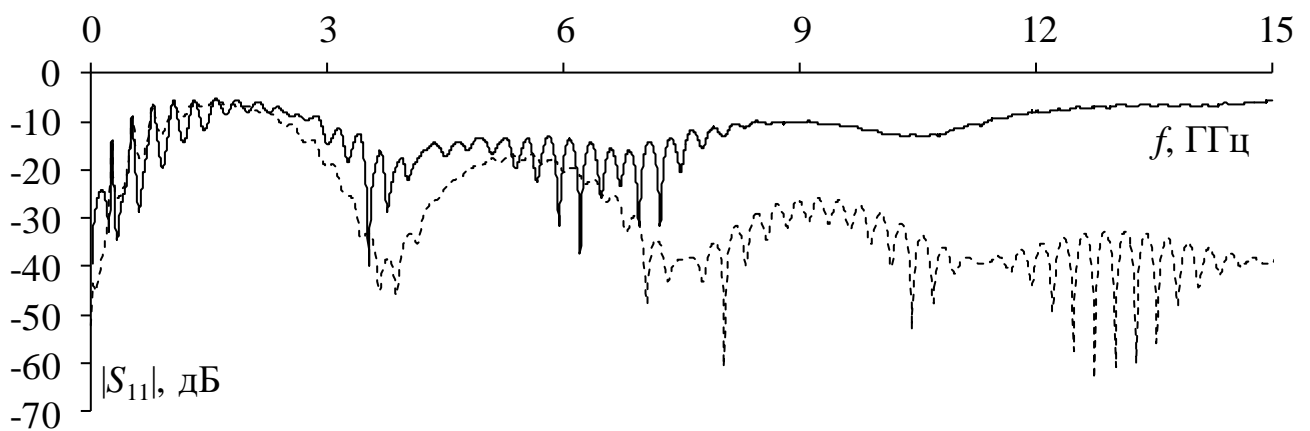
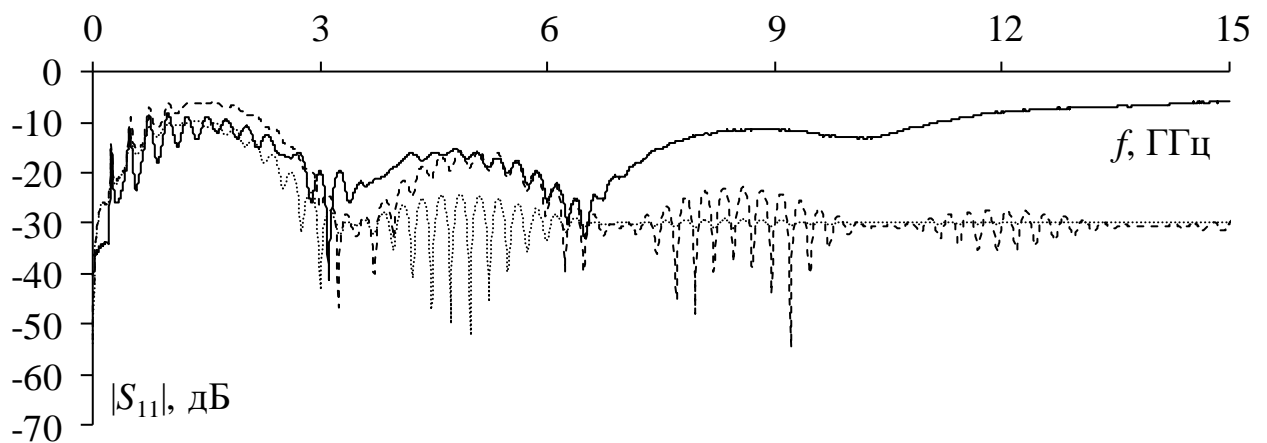
*a**б**в*

Рисунок 5.28 – Частотные зависимости  $|S_{11}|$  для макета 2, полученные при моделировании без учета (—), с учетом (· ·) изменения потерь и эксперименте (—) для  $T = -50$  (а), 25 (б), 150 (в) °C

На рисунке 5.29 представлены частотные зависимости  $|S_{21}|$  для моделирования и эксперимента при  $T = -50, 25$  и  $150$  °С. Видно, что с изменением  $T$  частотные зависимости  $|S_{21}|$  изменяются значительно. Для более точного сравнения результатов моделирования и эксперимента они представлены отдельно для  $T = -50, 25$  и  $150$  °С на рисунке 5.30. Как видно, результаты моделирования и эксперимента хорошо согласуются в начале частотного диапазона и гораздо хуже в его конце.

Рассогласованность результатов на высоких частотах может быть связана с неучтённой частотной зависимостью параметров SMA соединителей, измерительных кабелей, а также различием принятых при моделировании и реальных значений диэлектрической проницаемости.

Таким образом, выполнено сравнение полученных при квазистатическом моделировании и эксперименте частотных зависимостей  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$ , показавшее значительные изменения при изменении  $T$  и корректность моделирования.

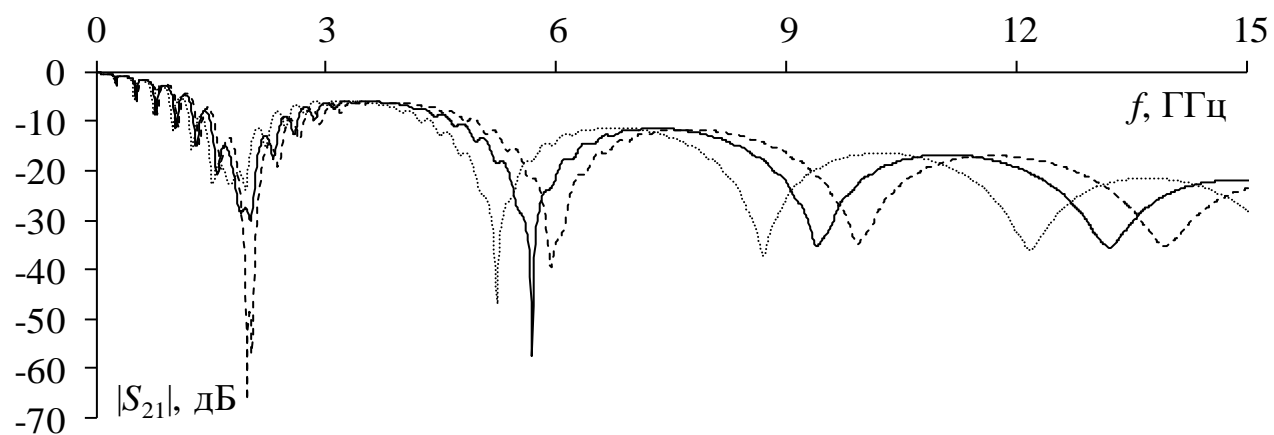
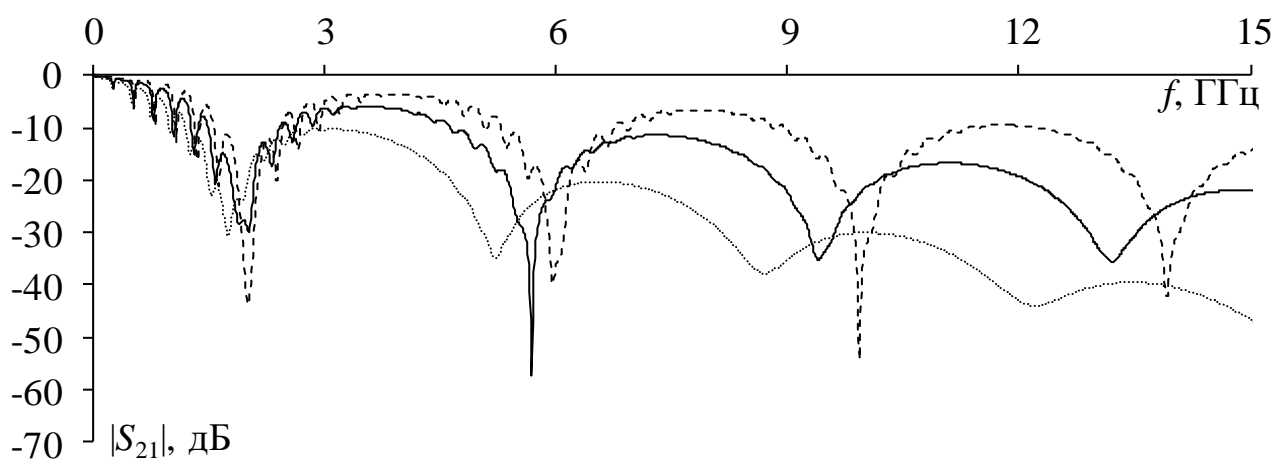
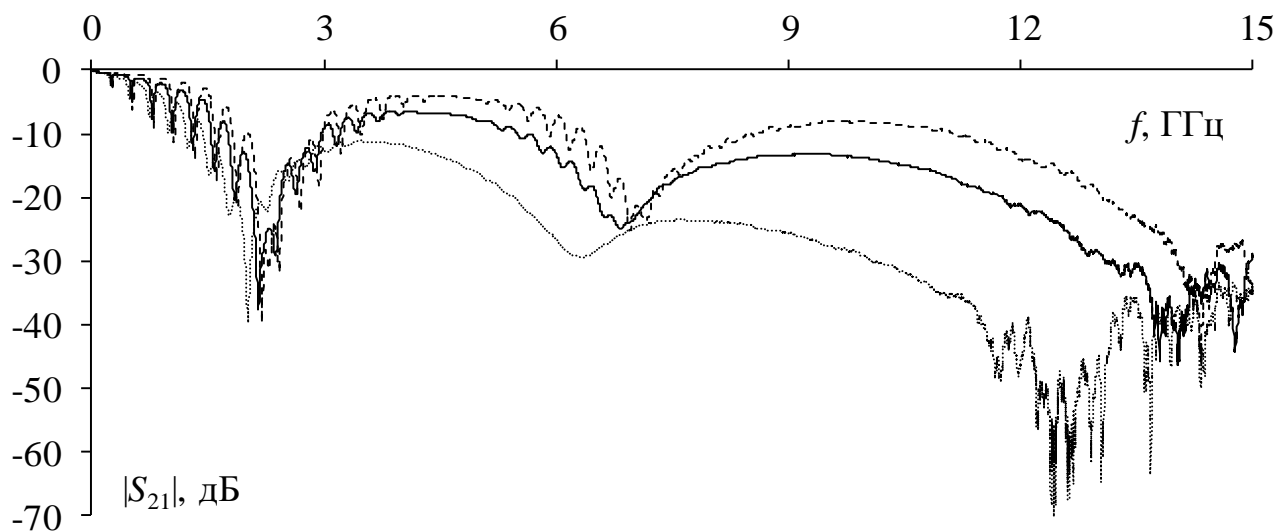
*a**б**в*

Рисунок 5.29 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  для макета 2, полученные при моделировании без учета (*a*), с учетом (*б*) изменения потерь и эксперименте (*в*) для  $T = -50$  (---),  $25$  (—),  $150$  (· · ·) °C

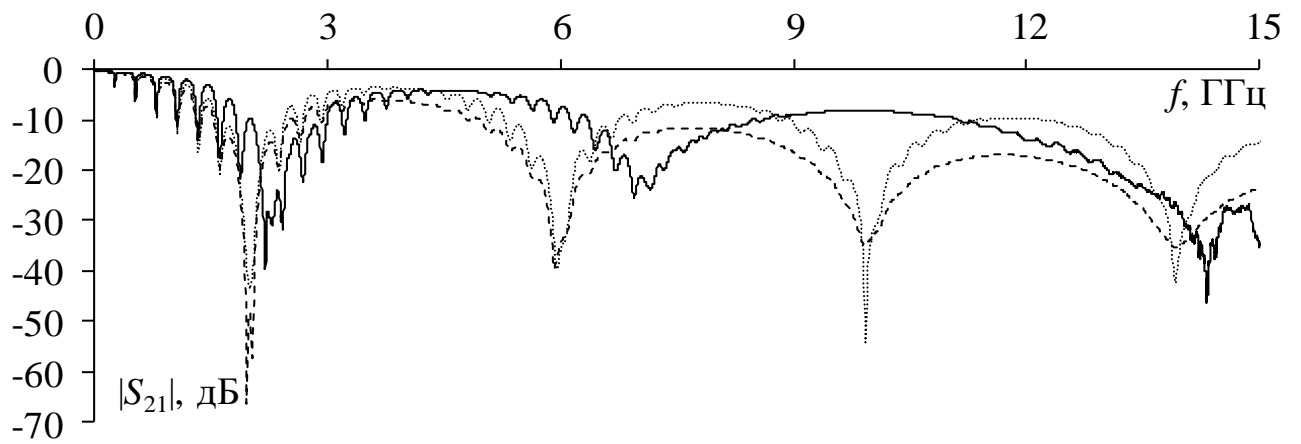
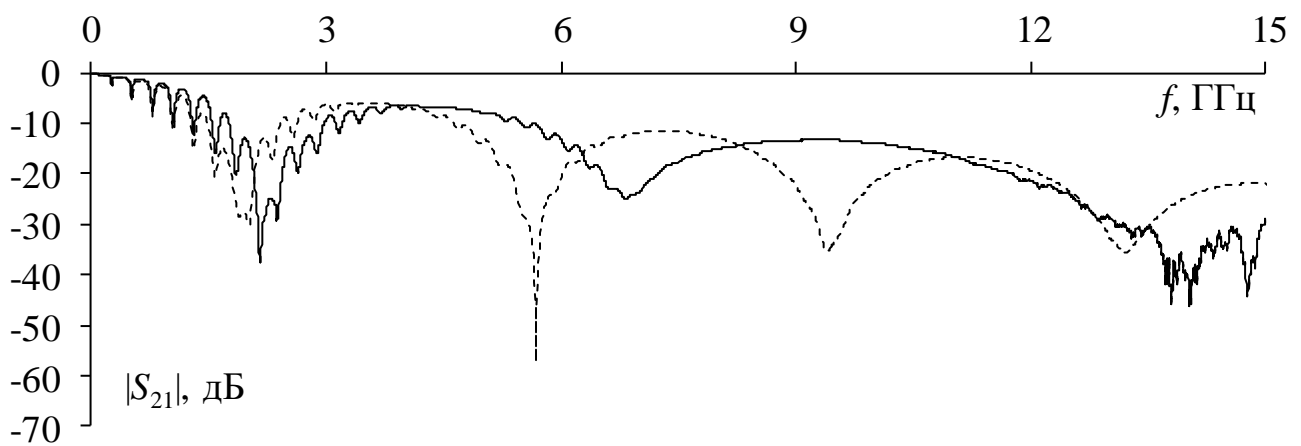
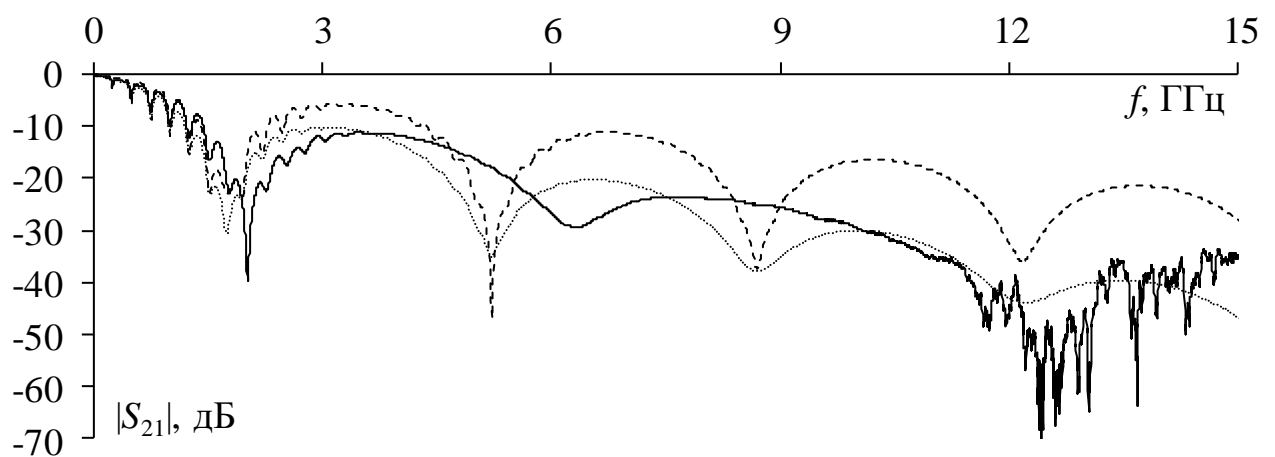
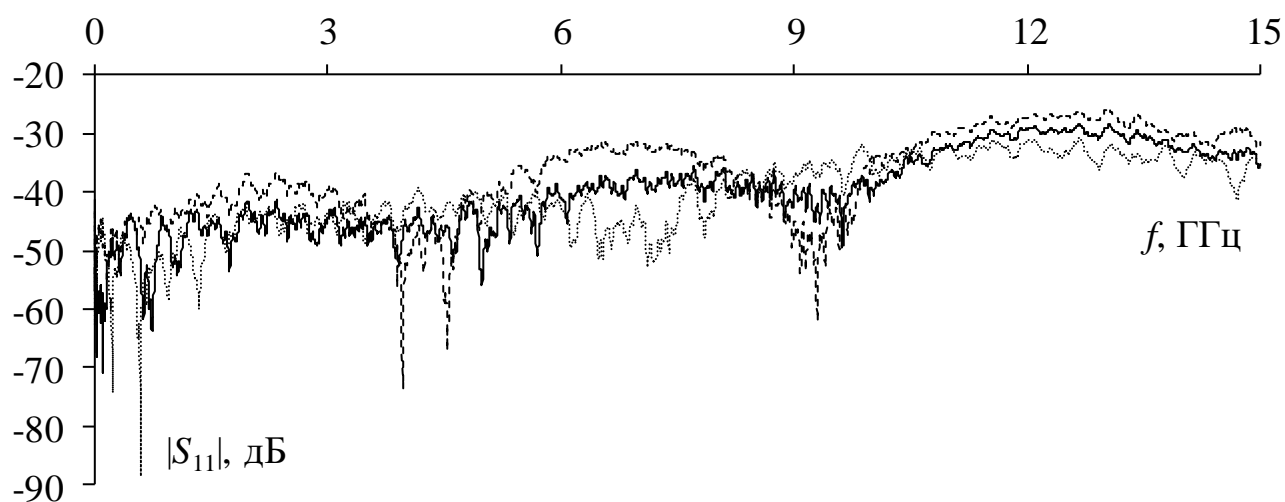
*a**б**в*

Рисунок 5.30 – Частотные зависимости  $|S_{21}|$  для макета 2, полученные при моделировании без учета (---), с учетом ( $\cdot \cdot$ ) изменения потерь и эксперименте (—) для  $T = -50$  (a), 25 (б), 150 (в) °C

На рисунке 5.31 представлены измеренные частотные зависимости  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$  в диапазоне частот до 15 ГГц для измерительных кабелей и перемычки при  $T = -50, 25$  и  $150$  °С. Видно, что с увеличением  $T$  зависимости  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$  слабо изменяются. При  $T = -50$  °С частотная зависимость  $|S_{21}|$  принимает положительные значения. Однако калибровка выполнялась только при  $T = 25$  °С. Кроме того, размах отклонений ( $\pm 0,15$  дБ) довольно мал.



*a*

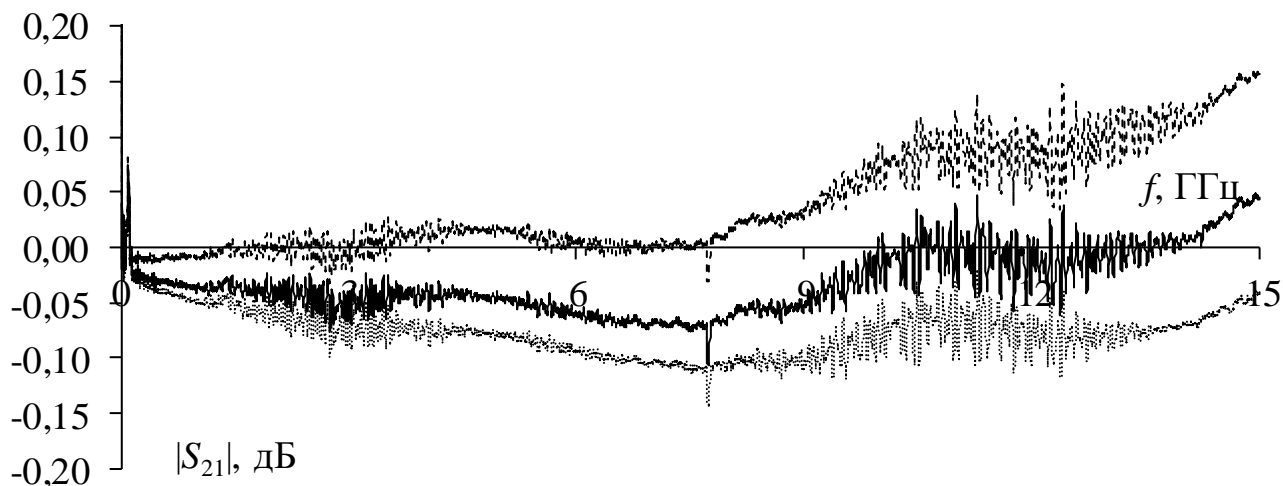


Рисунок 5.31 – Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (*a*) и  $|S_{21}|$  (*б*) для измерительных кабелей и перемычки, при  $T = -50$  (---),  $25$  (—),  $150$  (· ·) °С

Наконец, оценим различие измерений разными приборами. На рисунках 5.32 и 5.33 дополнительно приведено сравнение результатов экспериментов и моделирования для макета 2 во временной области и сравнение результатов экспериментов в частотной области из подраздела 5.3 и пункта 5.4.1



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.

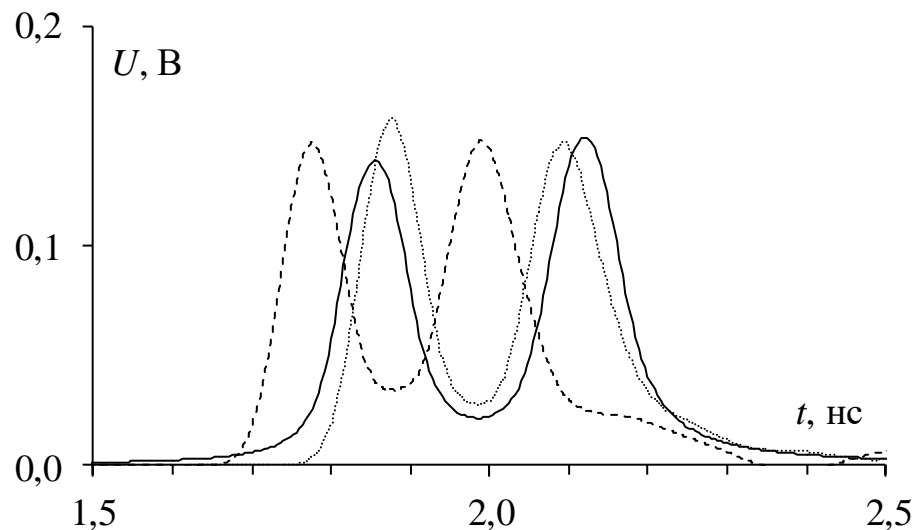


Рисунок 5.32 – Формы напряжения на выходе макета 2, полученные при моделировании (—) и с помощью P4M-40 (---) и R&S ZVA 40 (· ·)

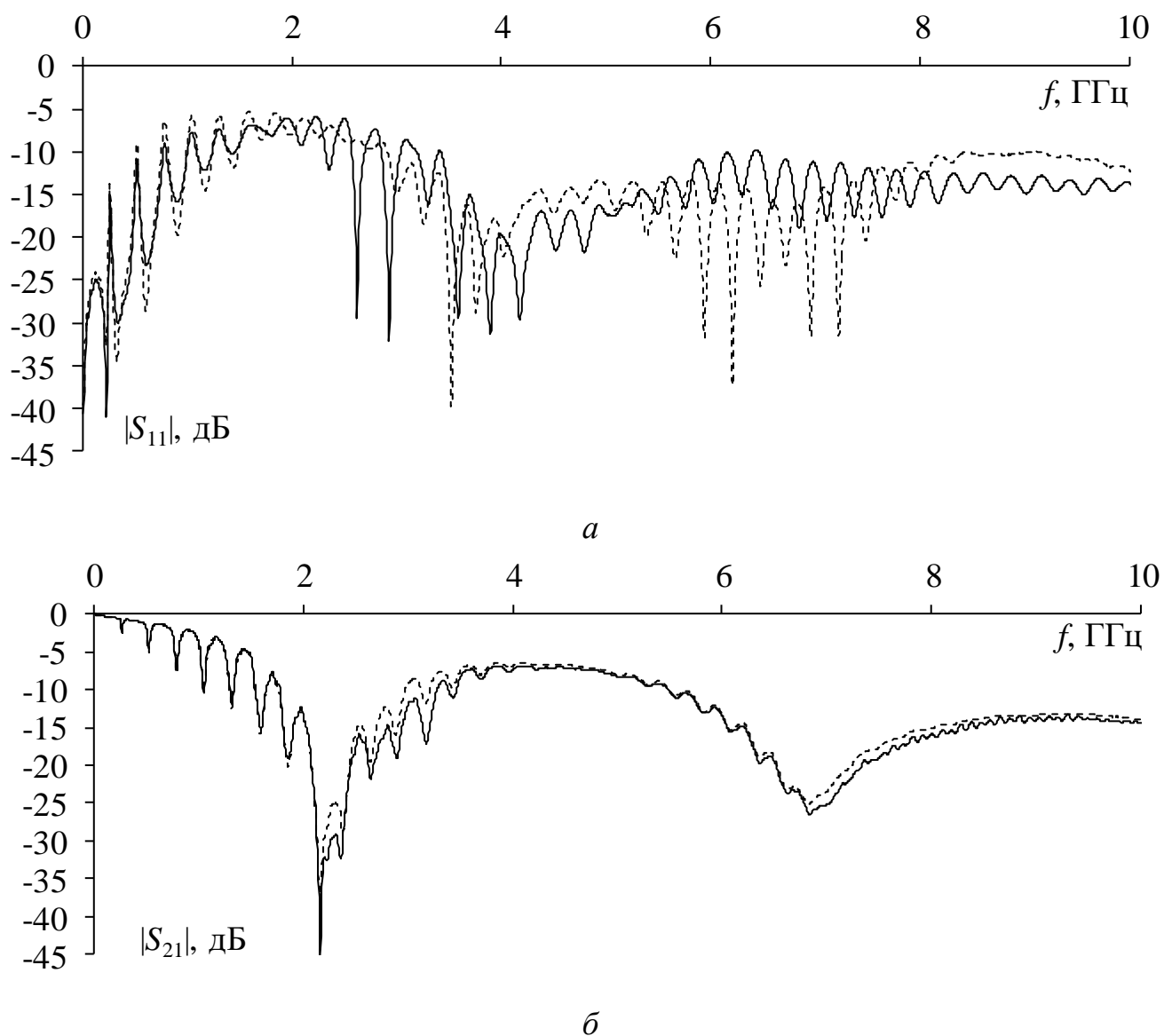


Рисунок 5.33 – Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  макета 2 (б), полученные с помощью P4M-40 (—) и R&S ZVA 40 (---)

## 5.5 Основные результаты раздела и выводы

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

2. Представлено сравнение временных откликов, полученных 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 продемонстрированы экспериментальные исследования макетов МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками. Представлены сравнения результатов 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. Представлены результаты измерения и моделирования в частотной области 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 диэлектрической проницаемости 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. Представлены сравнения результатов 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  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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 диэлектрической проницаемости. 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 проведенных 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 погонной задержки и волнового сопротивления 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 (погонная задержка, волновое сопротивление, собственные значения и векторы, временная и частотная характеристики) модифицированных МПЛ выявлено, что основное влияние температура оказывает на относительную диэлектрическую проницаемость. 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:  $\tau$  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 диэлектрической проницаемости от температуры. Предложенные МФ могут использоваться для защиты от сверхкоротких импульсов. 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maloratsky, L.G. Using modified microstrip lines to improve circuit performance / L.G. Maloratsky // High Frequency Electronics. – 2011. – Vol. 10, No. 5. – P. 38–52.
2. Газизов, Т.Р. Характеристики подвешенной и обращенной полосковых линий / Т.Р. Газизов // Известия вузов. Физика. – 1995. – Т. 39, №2. – С. 126–128.
3. Газизов, Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий: дисс. док.тех.наук: 05.12.07 / Газизов Тальгат Рашитович. – Т., 2010. – 309 с.
4. Hamood, M.K. Line thickness for various characteristic impedance of microstrip line / Tikrit journal of pure science. – 2013. – Vol. 18, No. 3. – P. 140–144.
5. Riaziat, M. Propagation modes and dispersion characteristics of coplanar waveguides // M. Riaziat, R. Majidi-Ahy, I.J. Feng // IEEE Trans. on microwave theory and techniques – March 1990. – Vol. 38, No 3. – P. 241–251.
6. Gazizov, T.R. Stable delay of microstrip line with side grounded conductors / T.R. Gazizov, V.K. Salov, S.P. Kuksenko // Wireless communications and mobile computing. – 2017. – P. 1–5.
7. Пат. 2584502 РФ. Микрополосковая линия со стабильной задержкой / Салов В.К., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. – № 2013159316/08; Заяв. 30.12.2013. Оpubл: 20.05.2016, Бюл. №14.
8. Газизов, Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / Под ред. Н.Д. Малютина. –Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 167 с.
9. Nakhla, M. Modeling and Simulation of High Speed VLSI Interconnects / M. Nakhla, Q.J. Zhang // Special Issue on High-speed Interconnects. International Journal on Analog Integrated Circuits and Signal Processing.– Jan. 1994. – Vol. 5.
10. Bogatin, E. Achieving impedance control targets / E. Bogatin, S. Zimmer // Printed circuit design & manufacture. –April 2004. –P. 28–31.
11. Tomar, R.S. New quasi-static models for the computer-aided design of suspended and inverted microstrip lines / R.S. Tomar, OP. Bhartia // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Apr. 1987. – МТТ–35. – P. 453–457.
12. Красноперкин, В.М. Анализ характеристик подвешенной и обращённой полосковых линий / В.М. Красноперкин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 12(336). – С. 32–38.
13. Бирюлин, Г.В. Расчет теплового режима электронных компонентов / Г.В. Бирюлин, В.И. Егоров, С.Ю. Муров // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных

- технологий, механики и оптики. – 2010. – №4 (68). – С. 51–55.
14. Максимов, Е.Ю. Моделирование влияния тепловых воздействий на характеристики микрополосковых антенн: автореф. дисс. канд.тех.наук: 05.13.18/ Максимов Евгений Юрьевич.–П., 2011.– 23 с.
  15. Куксенко, С.П. Электромагнитная совместимость: моделирование / под ред. Т.Р. Газизова . – Томск: В-Спектр, 2018. – 188 с.
  16. Многовариантный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ngpedia.ru/id32070p1.html> (дата обращения: 10.09.2020)
  17. Харрингтон, Р.Ф. Применение матричных методов к задачам теории поля // Труды института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1967. – № 2. – С. 5–19.
  18. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учеб. для вузов. – М.: Изд-во «Дизайн ПРО», 2004. – 640 с.
  19. Liu, Y. A novel fast iteration technique for scattering by 2-D perfect conducting cylinders / Y. Liu, J. Hu, K.K. Mei // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2002. – Vol. 44, № 1. – P. 263–265.
  20. Riazat, M. Single mode operation of coplanar waveguides // M. Riazat, R. Majidi-Ahy, I.J. Feng //Electron. Lett. – 1987. – Vol. 23, No 24. – P. 241–251.
  21. Marx, K.D. Propagation modes, equivalent circuits, and characteristic terminations for multiconductor transmission lines with inhomogeneous dielectrics / K.D. Marx // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – July 1973.– Vol. MTT-21. – P. 450–457.
  22. Riazat, M. Coplanar waveguides used in 2-18 Ghz distributed amplifier // M. Riazat, I. Zubeck, S. Bandy, G. Zdasiuk //IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. – June 1986.
  23. Griffith, J.R. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines / J.R. Griffith, M.S. Nakhla // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1990. – Vol. 38. № 11. – P. 1480–1487.
  24. Achar, R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S. Nakhla // Proceedings of the IEEE. –2001. –Vol. 89. № 5. – P. 693–728.
  25. Заболоцкий, А.М., Газизов, Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.
  26. Н.-М., Li. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of a PCB substrate for advanced packaging applications / Li Н.-М., Ra С.-Н. //Journal of the Korean Physical Society. – March 2009. –No. 3. – P. 1096–1099.
  27. Сагиева, И. Исследование характеристик экранированной микрополосковой линии / И. Сагиева // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12/2. – С. 103–107.
  28. 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.
  29. Сагиева, И.Е. Экранирование микрополосковой линии как ресурс для



- уменьшения чувствительности ее характеристик / И.Е. Сагиева // 23-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-23-2017)». – Томск, Россия, 24 ноября, 2017. – С. 145–149.
30. 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
  31. 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.
  32. 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.
  33. 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.
  34. 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.
  35. Сагиева, И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками у границы воздух-подложка / И.Е. Сагиева // 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.
  36. Сагиева, И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками у границы воздух-подложка при изменении толщин проводников / И.Е. Сагиева // 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.
  37. 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.
  38. 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.
39. 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, S.P. Kuksenko // Complexity. – 2019. – Vol. 2019. – P.1 – 11.
  40. 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. – 2020. – Vol. 1679. – P. 1–5.
  41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611481.TALGAT 2017. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Куксенко С.П., Сагиева И и др. Заявка №2017663209. Дата поступления 13 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.
  42. Сагиева, И.Е. Микрополосковая линия с заземленным проводником сверху, защищающая от сверхкоротких импульсов / И.Е. Сагиева // 26-я. Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-26-2020». –Томск, Россия, 24 ноября, 2020. – С. 123–126.
  43. 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.
  44. 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.
  - 45 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.
  46. Бахарев, С.И., Вольман, В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.
  47. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 132 с.
  48. 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.
  49. Куксенко, С.П. Переформирование преобусловливателя при решении

- последовательности систем линейных алгебраических уравнений / С.П. Куксенко, А.А. Квасников, И.Е. Сагиева // Тезисы докладов международной науч. конференции «Методы и математическая физика». – Сочи, Россия, 10–15 августа, 2020. – С. 93–96.
50. 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.
  51. Ландберг, Г.С. Элементарный учебник физики. Механика. Теплота. Молекулярная физика. М.: Наука, 1985, 606 с.
  52. Новотник, М. Высокмолекулярные электронные модули на основе органических плат / М. Новотник // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 8. – С. 51–55.
  53. Нурхан, Б.Е. Влияние температуры на характеристики микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками сверху / Б.Е. Нурхан, И.Е. Сагиева // Материалы XV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 18–20 ноября, 2020. – Ч. 1. – С. 310–312.
  54. Сагиева, И.Е. Влияние температуры на характеристики микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками / И.Е. Сагиева, Б.Е. Нурхан // Материалы науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР–2021» – Томск, Россия, 19–21 мая, 2021. – Ч. 1. – С. 226–229.
  55. 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.
  56. 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. – Erlagol, Altai, June 30 – July 4, 2021. – P. 183–186.
  57. Park, S.W. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain / S.W. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – P. 436–446.
  58. You, H. Crosstalk analysis of high-speed interconnects and packages / H. You, M. Soma // IEEE Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference. – 1990. – P. 11.2.1–11.2.5.
  59. Vijai, K. On the analysis of symmetrical three-line microstrip circuits / K. Vijai, K. Tripathi // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – September 1977. – Vol. MTT-25, no. 9. – P. 726–729.
  60. Стеклотекстолиты теплостойкий и теплостойкий негорючий

фольгированный. Технические условия ТУ 2296-00 311436290-02. Срок введения с 01.04.2002 г.

61. Vikram, S. The effect of frequency and temperature on dielectric properties of pure poly vinylidene fluoride (PVDF) thin films / S. Vikram, S.K. Devendra, Y. Singh, D.C. Dhubkarya // Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists. – Hong Kong, March 17-19, 2010. – P. 1–4.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)



Акционерное общество  
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
имени академика М.Ф. Решетнёва»



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972  
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru  
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора  
по электрическому проектированию и  
системам управления КА акционерного  
общества «Информационные  
спутниковые системы» имени академика  
М.Ф. Решетнева (АО «ИСС»),  
председатель секции №2 НТС, к.т.н.  
доцент



С.Г. Кочура

2021 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы  
Сагиевой Индиры Ериковны

Комиссия в составе:

- главного конструктора - начальника отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС», к.т.н. В.Н. Школьного;
- начальника отдела АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова;
- начальника сектора АО «ИСС», М.М. Иванова

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС» результатов диссертационной работы И.Е. Сагиевой по оценке чувствительности характеристик модифицированных микрополосковых линий.

Эти результаты отражены в отчете по этапу 2 проекта «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов»,

выполненного в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0172. Они позволили выбрать и реализовать устройство помехозащиты бортовой РЭА и подготовить новый проект «Разработка математических моделей, технологий, методик и аппаратно-программных средств для обеспечения электромагнитной совместимости цепей электропитания перспективных космических аппаратов», включенный в Комплексный план исследований КНТП «Глобальные информационные спутниковые системы».

Главный конструктор - начальник  
отделения проектирования и испытаний  
РЭА АО «ИСС», к.т.н.

  
В.Н. Школьный

Начальник отдела АО «ИСС», к.т.н.

  
С.Б. Сунцов

Начальник сектора АО «ИСС»

  
М.М. Иванов





«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

к.т.н., доцент

Сенченко П.В.

12.10.2021 г.

**АКТ**

**внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы  
Сагиевой Индиры Ериковны**

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по научной работе, д.т.н. Куксенко С.П., заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе Бусыгина А.В. настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ радиотехнического факультета следующих результатов диссертационной работы Сагиевой И.Е.:


1. Результаты оценки чувствительности характеристик модифицированных микрополосковых линий использованы для проведения практических занятий и 6 курсовых работ по дисциплине «Электромагнитная совместимость бортовой радиоэлектронной аппаратуры» в 2017–2018 учебном году магистерской программы «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры».


2. Результаты оценки чувствительности характеристик микрополосковых линий с заземленными проводниками сверху использованы для проведения 3 курсовых работ по дисциплине «Электромагнитная совместимость и управление радиочастотным спектром» в 2018–2019 учебном году бакалавриата по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

3. Результаты квазистатического анализа полосковых структур с полигонами использованы в выпускной квалификационной работе в 2018–2019 учебном году бакалавриата по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

4. Результаты оценки влияний температуры на характеристики микрополосковых линий с заземленными проводниками сверху использованы в курсовой работе, преддипломной практике и выпускной квалификационной работе в 2019–2020 учебном году бакалавриата по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

5. Результаты оценки влияний температуры на временные отклики микрополосковых линий с полигонами используются в научно-исследовательской работе (производственной практике) в 2021–2022 учебном году магистерской программы «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе».

Заместитель заведующего каф. ТУ по научной работе  /С.П. Куксенко

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе  /А.В. Бусыгина

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(РОСПАТЕНТ)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993. Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

На № - от -

Наш № 2020130784/07(055708)

*При переписке просим ссылаться на номер заявки*

**Исходящая корреспонденция от**

**18.10.2021**

Аркатова Ольга Евгеньевна  
пр. Ленина, 40  
г. Томск  
634050

**Р Е Ш Е Н И Е**  
**о выдаче патента на изобретение**

(21) Заявка № 2020130784/07(055708)

(22) Дата подачи заявки 18.09.2020

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что заявленное изобретение относится к объектам патентных прав, соответствует условиям патентоспособности, сущность заявленного изобретения (изобретений) в документах заявки раскрыта с полнотой, достаточной для осуществления изобретения (изобретений)\*, в связи с чем принято решение о выдаче патента на изобретение.

Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 5 л. в 1 экз.

Начальник Управления  
организации  
предоставления  
государственных услуг

Документ подписан электронной подписью  
Сведения о сертификате ЭП  
Сертификат  
024B597C0071ACE48242DDD2C8EF47F77C  
Владелец Травников  
Дмитрий Владимирович  
Срок действия с 12.11.2020 по 15.10.2035

Д. В. Травников



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ**

(21) Заявка № 2020130784/07(055708) (22) Дата подачи заявки 18.09.2020  
(24) Дата начала отсчета срока действия патента 18.09.2020

**ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ**

(22) подачи заявки 18.09.2020

(72) Автор(ы) Сагиева Индира, KZ, Газизов Тальгат Рашитович, RU

(73) Патентообладатель(и) федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», RU

(54) Название изобретения **МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ С ДВУМЯ СИММЕТРИЧНЫМИ ПРОВОДНИКАМИ СВЕРХУ, ЗАЩИЩАЮЩАЯ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ**



Авторы: *Газизов Тальгат Рашитович (RU), Мелкозеров Александр Олегович (RU), Газизов Тимур Тальгатович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Заболоцкий Александр Михайлович (RU), Газизов Руслан Рифатович (RU), Бусыгина Анна Владимировна (RU), Лежнин Евгений Владимирович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Суровцев Роман Сергеевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Ахунов Роман Раисович (RU), Газизов Рустам Рифатович (RU), Газизов Александр Тальгатович (RU), Хажибеков Роман Русланович (KZ), Квасников Алексей Андреевич (RU), Носов Александр Вячеславович (KZ), Белоусов Антон Олегович (KZ), Тернов Станислав Анатольевич (KZ), Сагиева Индира Ериковна (KZ), Демаков Александр Витальевич (RU), Осинцев Артем Викторович (KZ), Собко Александр Александрович (KZ)*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018661873

Вычисление характеристик экранированной  
микрополосковой линии

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Сагиева Индира Ериковна (KZ),  
Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2018616265

Дата поступления 18 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 сентября 2018 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иванов



# ДИПЛОМ I СТЕПЕНИ

награждается

**Индира Ериковна Сагиева**

за лучший доклад на  
Международной научно-практической  
конференции «**Электронные средства  
и системы управления**»

18 - 20 ноября 2020 г., г. Томск

Секция 12. Электромагнитная совместимость

Председатель конференции

Ректор ТУСУРа



**В.М. Рулевский**



МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ (МАН ВШ)  
 АКАДЕМИЯ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИИ (АН ВШ РФ)  
 СИБИРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ (САН ВШ)  
 ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
 СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

# Диплом

награждается

*Сагиева Индира Ериковна*

аспирант,  
 младший научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУР

за доклад

**«РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
 КАК РЕСУРС ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
 ОБУЧЕНИЯ ПО МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЕ»**

на 24-й Международной  
 научно-практической конференции  
**«ПРИРОДНЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ  
 РЕСУРСЫ СИБИРИ»**  
 (СИБРЕСУРС-24-2018)

Председатель САН ВШ,  
 ректор ТУСУРа



*А.А. Шелупанов*

28 ноября 2018 г.

Томск




 Национальный исследовательский  
 Томский государственный  
 университет  
 «Nano and Giga Solutions Inc.»  
 Радиофизический факультет

International Symposium  
**Nano and Giga Challenges  
 in Electronics, Photonics  
 and Renewable Energy**




Current trends  
 in Radiophysics  
 CTRP2017  
 Workshop  
 Nanotechnology  
 in Space  
 Workshop  
 Computational  
 Design of Materials  
 and Devices  
 Workshop on Emerging  
 Digital Design and  
 Computer Architecture  
 Workshop  
 Nanotechnology

**ДИПЛОМ  
 III степени**  
 награждается  
**Сагиева Индира Ериковна**  
 ТУСУР, г. Томск, Россия

за стендовый доклад на тему  
**«Исследование характеристик экранированной  
 микрополосковой линии»**

Седьмой Международной конференции  
 «Актуальные проблемы радиофизики»  
 и Седьмой Международной конференции и школы «Nano and Giga  
 Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy»

Председатель Оргкомитета NGC2017,  
 советник ректора, профессор  Г.Е. Дунаевский

Зам. председателя «Оргкомитета АПР-2017»,  
 декан РФФ  А.Г. Коротаев

Томск, 18 - 22 сентября 2017 г.





**TUSUR** | TUSUR UNIVERSITY

# Диплом II степени

награждается

Сагиева Индира

за лучший доклад на  
Международной научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
**«НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР»**  
секция 2 «Электроника и приборостроение»  
подсекция 2.6 «Электромагнитная совместимость»

Председатель конференции



**А.А. Шелупанов**  
Ректор ТУСУРа

16 – 18 мая 2018 г.

г. Томск

**TUSUR** | TUSUR  
UNIVERSITY  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники



Международная  
научно-практическая  
конференция  
«ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА  
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»

# Диплом III степени

награждается

*Сажиева  
Индирра*

за лучший доклад на  
Международной научно-практической  
конференции «Электронные средства  
и системы управления»

секция 13 «Электромагнитная совместимость»

**Председатель конференции**

Ректор ТУСУРа



*А.А. Шелупанов*

А.А. Шелупанов

29 ноября – 1 декабря 2017 г.

г. Томск