


На правах рукописи



**Кенжегулова Зарина Муратбековна**

**Аналитические модели защитных полосковых устройств  
на основе метода модального разложения во временной области**

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

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2023

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

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

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

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

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
университет»

Защита состоится 4 июля 2023 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/e7jtlvad>

Автореферат разослан \_\_\_\_ мая 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических  
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Высокие достижения современной науки и техники обеспечили проникновение радиоэлектронных средств (РЭС) во многие сферы деятельности человека. Увеличивающееся быстродействие и высокая плотность трассировки печатных плат устройств привели к росту восприимчивости РЭС к электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Среди них наиболее опасны мощные сверхширокополосные (СШП) импульсы. Широкий спектр и высокая мощность позволяют им проникать внутрь РЭС и выводить чувствительные цепи из строя. Для защиты от СШП воздействий применяют различные методы, один из которых, основан на модальном разложении помехи в полосковых устройствах: модальных фильтрах (МФ) и меандровых линиях (МЛ). Для расчета их характеристик применяют математическое моделирование, которое в общем случае требует решения уравнений Максвелла. Но затраты вычислительных ресурсов на такое моделирование часто высоки, даже для простых конфигураций. В ряде случаев для анализа полосковых устройств применимы и простые аналитические модели. Примером является подход, основанный на применении метода модального разложения во временной области для анализа перекрестных помех. Между тем, его применение для аналитического расчёта отклика защитных полосковых устройств ранее почти не рассматривалось.

**Степень разработанности темы.** Повышение помехозащищенности РЭС и обеспечение защиты от ЭМВ исследовали J. Haseborg, F. Rachidi, W. Radasky, F. Sabath, C. Klunder и др. Среди отечественных учёных анализом стойкости электронных систем к СШП воздействию и созданием методов измерений расчета занимаются Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, В.Ю. Кириллов, Л.О. Мырова и др., а исследованием результата их воздействия на вычислительную технику – С.Ф. Чермошенцев, З.М. Гизатуллин, Р. Киричек. Исследованием полосковых фильтров для защиты занимались R. Krzikalla, M. Camp, T. Weber и др. Среди отечественных ученых анализом связанных линий занимались Б.А. Беляев, Н.Д. Малютин, Э.В. Семенов, А.Н. Сычев и др. Исследованию модальных явлений в связанных линиях посвятили работы Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, и др. Разработкой методов вычисления отклика посвятили свои работы L. Pipes, C. Paul, H. You, M. Soma, V. Tripathi, Y. Kami, F. Xiao, S. Park и др.

**Цель работы** – разработать аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальными явлениями и продемонстрировать их применимость для исследования распространения помеховых воздействий.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать комплекс аналитических моделей для анализа полосковых структур с модальными явлениями и выполнить их верификацию.
2. Исследовать распространение помеховых воздействий в полосковых устройствах с модальными явлениями с помощью разработанных моделей.

### **Научная новизна**

1. Разработан комплекс аналитических моделей временного отклика двух- и трехпроводного модальных фильтров и витка меандровой линии на произвольное воздействие, отличающихся возможностью учёта асимметрии поперечного сечения и окончаний этих устройств.

2. Впервые получены аналитические модели нормированных амплитуд составляющих отклика, и условия их равенства, на выходе двухпроводного модального фильтра для общего и ряда частных случаев выбора окончаний его пассивного проводника и трехпроводного модального фильтра на основе модифицированной микрополосковой линии с двумя заземленными на концах пассивными проводниками.

3. Впервые выполнено аналитическое, численное и экспериментальное исследование отклика полосковых устройств с модальными явлениями на типовые формы помеховых воздействий: гауссов импульс, затухающую синусоиду и синусоиду, модулированную гауссовым импульсом.

#### **Теоретическая значимость**

1. Получены выражения для нормированной амплитуды составляющих сигнала на выходе полосковых устройств на основе модальных явлений.

2. Сформулированы условия равенства составляющих отклика на выходе двух- и трехпроводного модальных фильтров.

3. С помощью диаграмм координата-время изучено распространение синфазной и дифференциальной мод в витке меандровой линии.

4. Для апробации и доказательства применимости моделей временного отклика результативно применены математическое моделирование методами моментов и конечных разностей во временной области, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и лабораторный эксперимент.

#### **Практическая значимость**

1. Доказана применимость аналитических моделей временного отклика для предварительного вычисления формы напряжения на выходе полосковых устройств с модальными явлениями.

2. Предложена методика синтеза пассивных полосковых устройств защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением.

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

**Методология и методы исследования.** В работе использованы математическое моделирование методами моментов и конечных разностей во временной области, квазистатический и электродинамический подходы, параметрическая оптимизация эвристическим поиском, а также лабораторный эксперимент на базе векторного анализатора цепей.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанные аналитические модели временного отклика двух- и трехпроводного модальных фильтров и витка меандровой линии применимы для вычисления отклика на воздействие произвольной формы.

2. Равенство амплитуд составляющих временного отклика на выходе двухпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии с заземленным на концах проводником сверху и трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии с двумя заземленными на концах пассивными проводниками зависит от параметров только поперечного сечения устройств и не зависит от резистивных окончаний активного проводника.

3. Аналитическое вычисление формы напряжения на выходе полосковых устройств с модальными явлениями позволяет выполнить оценку защитных характеристик с помощью  $N$ -норм при воздействии гауссова импульса, затухающей синусоиды и синусоиды, модулированной гауссовым импульсом.

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

**Достоверность результатов** основана на корректном применении теории линий передачи, совпадении результатов аналитического и квазистатического моделирования и их согласованностью с результатами электродинамического моделирования и измерений, использовании для проведения измерений сертифицированных аппаратно-программных комплексов.

#### **Использование результатов исследований**

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

2. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости», проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 г.

3. НИР «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей», грант РНФ 20-19-00446, 2020–2022 г.

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

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

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

7. НИР «Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для задач моделирования помехового синусоидального воздействия на печатные устройства защиты при проектировании радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости» по гранту Президента РФ, проект № МК-396.2022.4, 2022–2023 г.

8. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР.

#### **Апробация результатов**

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах грантов: РНФ (проект № 21-79-00161 2021–2023 гг.); государственного задания (проекты FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг., FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.); Президента Российской Федерации (проект МК-396.2022.4., 2022–2023 гг.).

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих симпозиумов и конференций: Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2019, 2021; Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2020, 2021; Всерос. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и когнитивная электросвязь», г. Екатеринбург, 2020; Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, респ. Алтай, 2021, 2022; Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences, г. Новосибирск, 2022.

**Публикации.** Результаты отражены в 12 публикациях (1 без соавторов): 1 монография; 2 статья в журналах из перечня ВАК; 1 статье в журнале, индексируемом Scopus; 2 докладах в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 5 докладах в трудах других конференций.

**Личный вклад.** Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Разработка моделей временного отклика полосковых устройств и условий равенства выполнена совместно с руководителем. Основной объем квазистатического моделирования выполнен автором единолично. Часть работ выполнена с соавторами публикаций. Разработка макетов и их измерения выполнены совместно с С. Карри.

**Структура и объем диссертации.** В состав диссертации входят введение, 3 главы, заключение, список литературы из 163 наименований, приложения из 8 с. Объем диссертации с приложениями – 166 с., в т.ч. 62 рисунка и 20 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. Защита радиоэлектронных устройств от мощных преднамеренных сверхширокополосных помех: обзор**

**В разделе 1.1** показана актуальность разработки аналитических моделей для вычисления временного отклика. **В разделе 1.2** представлен обзор методов защиты РЭС от СШП помех, среди которых выделены полосковые устройства на основе явления модального разложения. **В разделе 1.3** представлены методы анализа полосковых устройств, среди которых выделен аналитический подход для вычисления перекрестных помех в многопроводных линиях, а также метод оценки характеристик СШП помех на основе расчёта  $N$ -норм. **В разделе 1.4** сформулированы цель и задачи работы.

### **2. Аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальными явлениями**

**В разделе 2.1** на основе общего подхода разработаны модели временного отклика на концах 2- и 3-проводного МФ и витка МЛ из одного и двух отрезков (рисунок 2.1). Кратко опишем подход. Согласно нему для вычисления отклика сначала нужно задать форму напряжения источника воздействия через вектор  $\mathbf{V}$  и параметры окончаний отрезка через матрицы  $\mathbf{R}_S$  и  $\mathbf{R}_L$ . Затем на основе матриц погонных коэффициентов электромагнитной ( $\mathbf{L}$ ) и электростатической ( $\mathbf{C}$ ) индукции отрезка вычисляют матрицы преобразования мод  $\mathbf{T}_V$  и  $\mathbf{T}_I$ . Они нужны для перехода к вектору модальных источников напряжения  $\mathbf{v}_m$  и матрицам модальных импедансов  $\mathbf{R}_{Sm}$  и  $\mathbf{R}_{Lm}$  и последующего нахождения с их помощью вектора источников изначально падающих мод  $\mathbf{v}_{0m}$  и матриц коэффициентов

отражения на ближнем ( $\Gamma_S$ ) и дальнем ( $\Gamma_L$ ) концах отрезка. Тогда временной отклик на концах одиночного отрезка будет определяться как комбинация компонент изначально падающих мод и коэффициентов матриц отражения, соответствующих неоднородностям на стыках между отрезком и окончаниями.

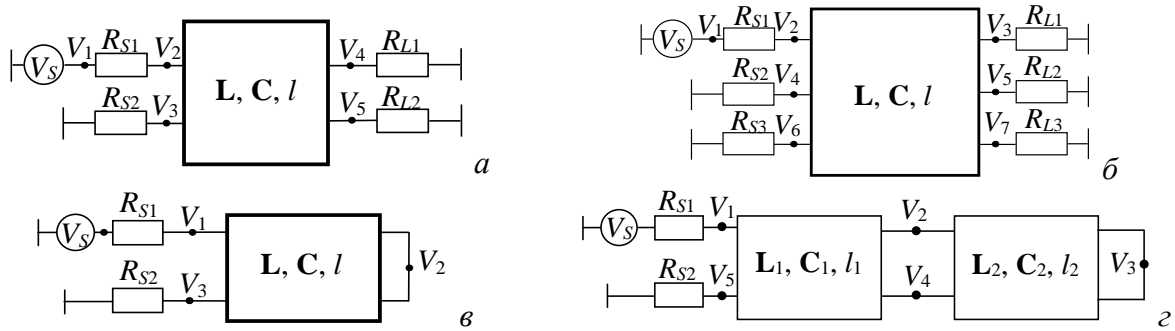


Рисунок 2.1 – Схема соединений исследуемых структур:

2- и 3-проводного МФ (а, б) и витка МЛ из одного и двух отрезков (в, г)

Рассмотрим получение моделей временного отклика на примере схемы распространения изначально падающих мод в 2-проводном МФ (рисунок 2.2).

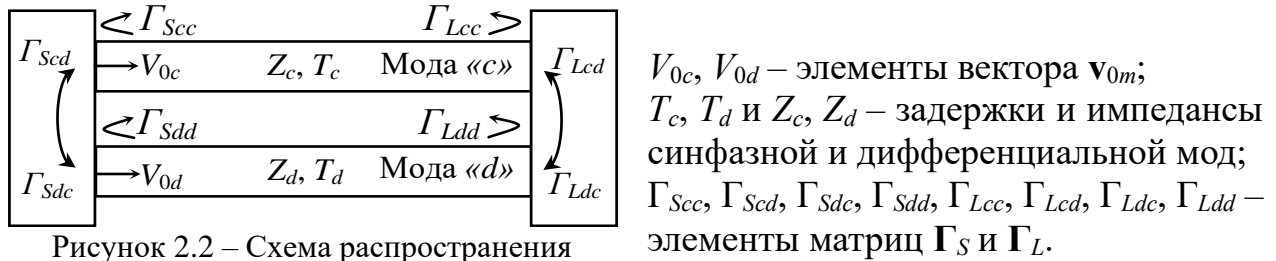


Рисунок 2.2 – Схема распространения падающих мод 2-проводного МФ

В соответствии со схемой и подходом, описанным выше, и обратного преобразования Лапласа для перехода из частотной области во временную получены модели первых двух компонент временного отклика для синфазной и дифференциальной мод на дальнем конце МФ ( $x=l$ ):

$$V_c(l, t) = (1 + \Gamma_{Lcc})V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{Lcd}V_{0d}(t - T_d); \quad (2.1)$$

$$V_d(l, t) = (1 + \Gamma_{Ldd})V_{0d}(t - T_d) + \Gamma_{Ldc}V_{0c}(t - T_c). \quad (2.2)$$

Тогда модель отклика на выходе активного проводника (узел  $V_4$  схемы на рисунке 2.1а) для 2-проводного МФ будет иметь вид

$$V_4(l, t) = T_{Vc,1} \left[ (1 + \Gamma_{Lcc})V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{Lcd}V_{0d}(t - T_d) \right] + T_{Vd,1} \left[ (1 + \Gamma_{Ldd})V_{0d}(t - T_d) + \Gamma_{Ldc}V_{0c}(t - T_c) \right]. \quad (2.3)$$

Аналогично получена модель временного отклика на выходе активного проводника 3-проводного МФ (узел  $V_3$  схемы на рисунке 2.1б), в котором распространяются 3 моды (для ясности обозначим их через индексы  $a$ ,  $b$  и  $c$ )

$$V_3(t) = T_{Va,1} \left[ (1 + \Gamma_{Laa})V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{Lab}V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{Lac}V_{0c}(t - T_c) \right] + T_{Va,2} \left[ (1 + \Gamma_{Lbb})V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{Lba}V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{Lbc}V_{0c}(t - T_c) \right] + T_{Va,3} \left[ (1 + \Gamma_{Lcc})V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{Lcb}V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{Lca}V_{0a}(t - T_a) \right], \quad (2.4)$$

где  $V_{0a}$ ,  $V_{0b}$ ,  $V_{0c}$  – элементы вектора  $\mathbf{v}_{0m}$  для 3-проводного МФ,  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  и  $Z_a$ ,  $Z_b$  и  $Z_c$  – задержки и импедансы мод, а  $\Gamma_{Laa}$ ,  $\Gamma_{Lab}$ , ...,  $\Gamma_{Lca}$  – элементы матрицы  $\Gamma_L$ .

Также получена модель временного отклика на выходе витка МЛ из одного отрезка (узел  $V_3$  схемы на рисунке 2.1б)

$$V_3(t) = T_{Vc,2} \left( \begin{array}{l} V_{0c}(t) + (1 + \Gamma_{Scc})V_{0c}(t - 2T_c) - \Gamma_{Scd}V_{0d}(t - 2T_d) + \\ + \Gamma_{Ldc}\Gamma_{Scd}V_{0c}(t - (T_c + T_d)) + \Gamma_{Lcd}(1 + \Gamma_{Scc})V_{0d}(t - (T_c + T_d)) \end{array} \right) + \quad (2.5)$$

$$+ T_{Vd,2} \left( \begin{array}{l} V_{0d}(t) - (1 + \Gamma_{Sdd})V_{0d}(t - 2T_d) + \Gamma_{Sdc}V_{0c}(t - 2T_c) + \\ + \Gamma_{Lcd}\Gamma_{Sdc}V_{0d}(t - (T_c + T_d)) + \Gamma_{Ldc}(1 + \Gamma_{Sdd})V_{0c}(t - (T_c + T_d)) \end{array} \right).$$

Наконец, получена модель временного отклика на выходе витка МЛ из двух отрезков с симметричным поперечным сечением, где распространяются чётная и нечётная моды (индексы  $e$  и  $o$ ) (узел  $V_5$  схемы на рисунке 2.1г)

$$V_5(t) = T_{Ve,2} \left[ V_{0e}(t) + \Gamma_{12ee}(1 + \Gamma_{See})V_{0e}(t - 2T_{e1}) + \Gamma_{12oo}\Gamma_{Soo}V_{0o}(t - 2T_{o1}) + \right. \quad (2.6)$$

$$\left. + (1 + \Gamma_{See})V_{0e21}(t - 2(T_{e1} + T_{e2})) + \Gamma_{Soo}V_{0o21}(t - 2(T_{o1} + T_{o2})) \right] +$$

$$+ T_{Vo,2} \left[ V_{0o}(t) + \Gamma_{12oo}(1 + \Gamma_{Soo})V_{0o}(t - 2T_{o1}) + \Gamma_{12ee}\Gamma_{Soo}V_{0e}(t - 2T_{e1}) + \right.$$

$$\left. + (1 + \Gamma_{Soo})V_{0o21}(t - 2(T_{o1} + T_{o2})) + \Gamma_{Soo}V_{0e21}(t - 2(T_{e1} + T_{e2})) \right].$$

Необходимо отметить, что модели временного отклика получены для всех узлов схем на рисунке 2.1, но с целью экономии места здесь они не приведены. Разработанные модели позволяют вычислить форму напряжения на воздействие произвольной формы на выходе МФ и МЛ с произвольными окончаниями.

**В разделе 2.2** выведены условия равенства амплитуд компонент отклика на выходе: 2-проводного МФ (для общего и частных случаев), для 3-проводного МФ на основе МПЛ с двумя заземленными на концах проводниками, а также на выходе витка МЛ с асимметричным поперечным сечением. Для вывода условий сначала получены модели нормированных амплитуд составляющих отклика на выходе каждого из устройств путём выделения компонент отклика из моделей (2.4)–(2.6), которые распространяются с одинаковой задержкой. Но из-за громоздкости, здесь они не приводятся.

На основе модели (2.3) для произвольных окончаний 2-проводного МФ получено общее условие, обеспечивающее равенство амплитуд составляющих на выходе 2-проводного МФ (рисунок 2.1а)

$$\frac{Z_c(T_{Id,2}R_{S2} + T_{Vd,2}Z_d)}{Z_d(T_{Ic,2}R_{S2} + T_{Vc,2}Z_c)} = - \frac{(\eta_I T_{Vd,1}R_{L2} + \eta_V T_{Id,1}Z_c)}{(\eta_I T_{Vc,1}R_{L2} + \eta_V T_{Ic,1}Z_d)}. \quad (2.7)$$

Примечательно, что условие (2.7) не содержит значений сопротивлений  $R_{S1}$  и  $R_{L1}$  на концах активного проводника, а зависит лишь от выбора окончаний пассивного проводника  $R_{S2}$  и  $R_{L2}$ . Поэтому для случая, когда заданы параметры поперечного сечения (известны матрицы  $\mathbf{T}_I$  и  $\mathbf{T}_V$  и импедансы мод  $Z_c$  и  $Z_d$ ) это условие позволяет выбрать  $R_{S2}$  и  $R_{L2}$ , обеспечивающие равенство амплитуд мод.

Для частного случая выбора равных окончаний проводников МФ ( $R_{S1}=R_{S2}=R_{L1}=R_{L2}=R$ ) условие (2.7) примет вид



$$\frac{Z_c (T_{Id,2}R + T_{Vd,2}Z_d)}{Z_d (T_{Ic,2}R + T_{Vc,2}Z_c)} = - \frac{(\eta_I T_{Vd,1}R + \eta_V T_{Id,1}Z_c)}{(\eta_I T_{Vc,1}R + \eta_V T_{Ic,1}Z_d)}. \quad (2.8)$$

Поскольку условие (2.7) не содержит параметров окончаний активного проводника, условие равенства амплитуд мод можно получить для разных случаев согласования пассивного проводника ( $R_{S2}$  и  $R_{L2}$ ). Примечателен случай, когда пассивный проводник закорочен на землю (на одном или двух концах). Тогда матрица модальных импедансов  $\mathbf{R}_m$  запишется как

$$\mathbf{R}_m = \frac{R}{(T_{Vc,1}T_{Vd,2} - T_{Vd,1}T_{Vc,2})} \begin{bmatrix} T_{Vd,2}T_{Ic,1} & T_{Vd,2}T_{Id,1} \\ -T_{Vd,1}T_{Ic,1} & -T_{Vc,2}T_{Id,1} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Для частного случая, когда ближний конец пассивного проводника МФ закорочен на землю ( $R_{S2}=0$ ) условие равенства амплитуд мод примет вид

$$\frac{T_{Vd,2}}{T_{Vc,2}} = - \frac{\eta_I T_{Vd,1}R_{L2} + \eta_V T_{Id,1}Z_c}{\eta_I T_{Vc,1}R_{L2} + \eta_V T_{Ic,1}Z_d}, \quad (2.10)$$

а когда пассивный проводник на дальнем конце закорочен на землю ( $R_{L2}=0$ ) –

$$\frac{T_{Ic,1}}{T_{Id,1}} = - \frac{(T_{Ic,2}R_{S2} + T_{Vc,2}Z_c)}{(T_{Id,2}R_{S2} + T_{Vd,2}Z_d)} \quad (2.11)$$

и когда пассивный проводник с двух концов закорочен на землю ( $R_{S2}=R_{L2}=0$ ) –

$$\frac{Z_c}{Z_d} = - \frac{T_{Ic,1}T_{Vd,2}}{T_{Id,1}T_{Vc,2}}. \quad (2.12)$$

Поскольку условие (2.12) не содержит параметров окончаний МФ, оно обеспечивает равные амплитуды мод вне зависимости от выбора конкретных окончаний. Примером структуры, когда  $R_{S2}=R_{L2}=0$  является МФ на основе МПЛ с заземленным проводником сверху.

На основе модели (2.2) 3-проводного МФ (рисунок 2.3) также можно получить модели нормированных амплитуд компонент отклика на его выходе и условия их равенства. Но из-за большого количества независимых переменных для произвольных окончаний (как на рисунке 2.1б) в аналитическом виде это сделать затруднительно. Поэтому рассмотрен частный случай, когда пассивные проводники МФ закорочены на землю на примере МФ на основе МПЛ с двумя заземленными проводниками сверху (рисунок 2.3).

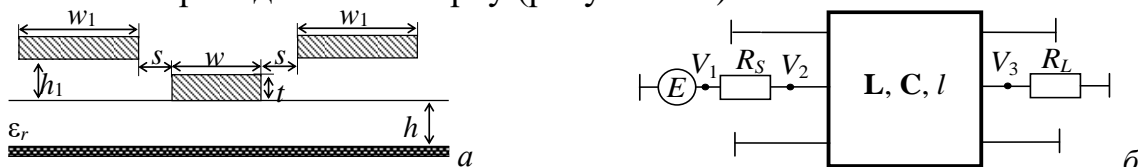


Рисунок 2.3 – Поперечное сечение (а) и схема соединения (б) МФ на основе МПЛ с двумя заземленными проводниками сверху

Матрица модальных импедансов  $\mathbf{R}_m$  на ближнем и дальнем концах МФ будет иметь следующий одинаковый вид

$$\mathbf{R}_m = \frac{R}{T_{Va,1}\eta_1 - T_{Va,2}\eta_2 + T_{Va,3}\eta_3} \begin{bmatrix} T_{Ia,1}\eta_1 & T_{Ia,2}\eta_1 & T_{Ia,3}\eta_1 \\ -T_{Ib,1}\eta_2 & -T_{Ib,2}\eta_2 & -T_{Ib,3}\eta_2 \\ T_{Ic,1}\eta_3 & T_{Ic,2}\eta_3 & T_{Ic,3}\eta_3 \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

где  $\eta_1 = (T_{Vb,2}T_{Vc,3} - T_{Vb,3}T_{Vc,2})$ ,  $\eta_2 = (T_{Vb,1}T_{Vc,3} - T_{Vc,1}T_{Vb,3})$ ,  $\eta_3 = (T_{Vb,1}T_{Vc,2} - T_{Vb,2}T_{Vc,1})$ .

Отметим, что симметрия поперечного сечения рассматриваемого МФ в совокупности с выражением (2.13) приводит к равенству 0 элементов матриц отражения  $\Gamma_{ac}$ ,  $\Gamma_{bc}$ ,  $\Gamma_{ca}$ , и  $\Gamma_{cb}$ . Также учет симметрии приводит к  $T_{Vac}=0$ , что исключает третью компоненту из модели (2.4). После всех преобразований условие равенства амплитуд мод  $a$  и  $b$  на выходе МФ будет иметь вид

$$\frac{Z_a}{Z_b} = -\frac{T_{Ia,1}\eta_1}{T_{Ia,2}\eta_2}. \quad (2.14)$$

Из условия видно, что оно не содержит  $R_S$  и  $R_L$  и обеспечивает равенство амплитуд мод вне зависимости от выбора окончаний.

Наконец, модели нормированных амплитуд получены для витка МЛ. На их основе также могут быть выведены условия их равенства. Отклик на выходе витка представлен 4 основными импульсами: перекрестной помехи, синфазной и дифференциальной мод и дополнительным. Поэтому для вывода условий необходимо попарно приравнять модели всех компонент отклика. Затем нужно выразить одно из неизвестных ( $Z_c$ ,  $Z_d$  и  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ ) через остальные и с помощью обратной подстановки найти каждое из них. Для этого нужно решать квадратные уравнения, но решения в общем виде оказываются громоздкими. Поэтому они не приведены.

**В разделе 2.3** выполнена верификация моделей временного отклика и условий равенства нормированных амплитуд его компонент. Для 2-проводного МФ это выполнено на примере структур из рисунка 2.4 с помощью модели (2.3) и численного моделирования. Верификация модели (2.4) выполнена для трехпроводного МФ из рисунка 2.3а. Верификации модели (2.5) витка МЛ из одного отрезка выполнена на примере асимметричной структуры с поперечным сечением из рисунка 2.4в, а модели (2.6) – для витка МЛ из двух отрезков на примере симметричной структуры из рисунка 2.4а.

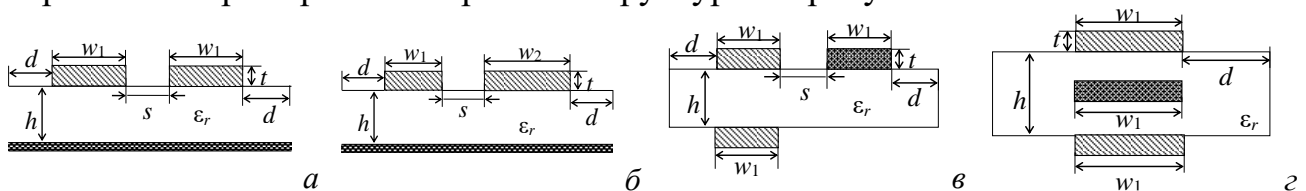


Рисунок 2.4 – Поперечные сечения 2-проводных МФ: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Из сравнения форм напряжения на выходе всех исследуемых структур, полученных разными подходами, выявлено полное совпадение откликов, что подтверждает корректность разработанных моделей.

Также выполнена проверка условий равенства нормированных амплитуд на выходе 2- и 3-проводного МФ. В результате доказано, что их выполнение обеспечивает равные амплитуды составляющих отклика на выходе полосковых устройств. Для экономии места эти результаты здесь не приводятся.

### 3. Исследование распространения помеховых воздействий в полосковых устройствах с модальными явлениями

В разделе 3.1 выполнен анализ распространения импульсного помехового сигнала в полосковых устройствах на основе диаграммы координата-время. Сначала рассмотрена одиночная линия передачи из двух отрезков для режимов ХХ и КЗ на дальнем конце второго отрезка. Затем представлены результаты аналогичного анализа витка МЛ из двух отрезков.

В разделе 3.2 представлен анализ распространения типовых помеховых воздействий (рисунок 3.1) в асимметричных полосковых устройствах на основе модальных явлений: 2-проводном МФ и витке МЛ (рисунок 2.1 б и в).

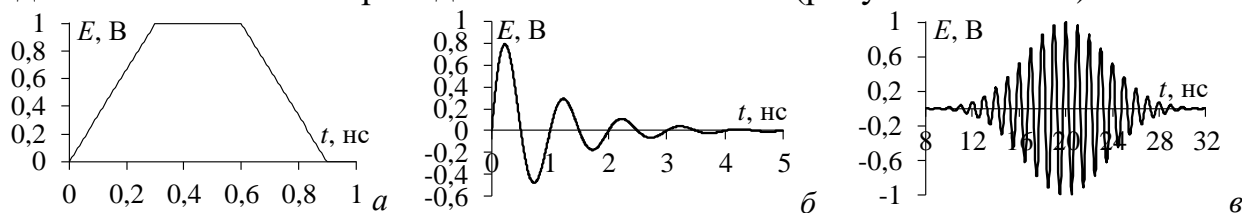


Рисунок 3.1 – Формы э.д.с. воздействий импульсным сигналом (а), затухающей синусоидой (б) и синусоидой с гауссовой модуляцией (в)

Формы напряжения на выходе МФ и МЛ, полученные аналитически и численно квазистатическим (в TALGAT) и электродинамическим (в EMPro) подходами показаны на рисунках 3.2 и 3.3 соответственно. Для простоты воздействие импульсным сигналом, затухающей синусоидой и синусоидой с гауссовой модуляцией далее называются воздействиями 1, 2 и 3.

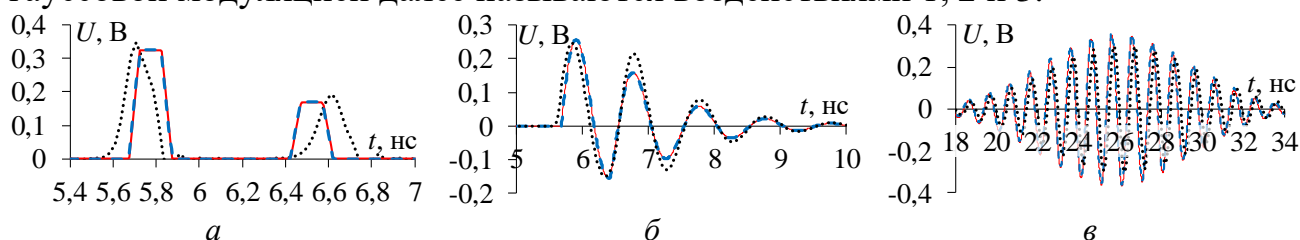


Рисунок 3.2 – Формы напряжений на выходе МФ при воздействиях 1 (а), 2 (б) и (в), полученные аналитически (—•—) и квазистатическим (—) и электродинамическим (•••) подходами

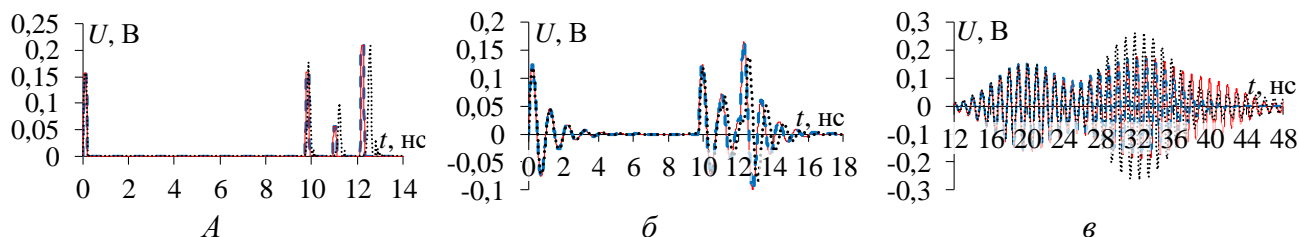


Рисунок 3.3 – Формы напряжений на выходе витка МЛ при воздействиях 1 (а), 2 (б) и 3 (в), полученные аналитически (—•—) и квазистатическим (—) и электродинамическим (•••) подходами

Из сравнения откликов, представленных на рисунках 3.2 и 3.3, видно, что они хорошо согласуются. Исключением является отклик для витка МЛ на воздействие 3, поскольку отличие амплитуд полуволн может достигать 38%. Это объяснимо тем, что модель не учитывает распространение отражений. В таблицу 3.1 сведены ослабления воздействий в МФ и витке МЛ (относительно половины э.д.с.).

Таблица 3.1 – Ослабления амплитуды воздействий 1, 2 и 3 на выходе МФ и МЛ

Способ вычисления	МФ			МЛ		
	Возд. 1	Возд. 2	Возд. 3	Возд.1	Возд. 2	Возд. 3
Аналитический	1,56	1,57	1,38	2,4	2,67	3,1
Квазистатический	1,56	1,57	1,38	2,4	2,67	1,74
Электродинамический	1,47	1,58	1,7	2,24	2,79	2,12

Результаты таблицы 3.1 подтверждают вывод, сделанный ранее: хорошее количественное согласование результатов получено для всех случаев, кроме воздействия 3 на виток МЛ. Таким образом, показана применимость моделей временного отклика полосковых устройств для расчёта формы напряжения на типовые помеховые воздействия.

**В разделе 3.3** представлена методика синтеза полосковых устройств защиты от импульсных воздействий на основе витка МЛ с асимметричным поперечным сечением. В её основе лежит аналитическое вычисление отклика на основе модели (2.5). Для апробации методики выполнено моделирование. В качестве основы платы выбран материал Arlon AD1000 с толщиной 0,508 мм ( $t=18$  мкм) и  $\epsilon_r=10,2$  и  $\tan\delta=0,0023$  при  $f=10$  ГГц. Сопротивление тракта 50 Ом ( $R_S=R_{S1}=R_{S2}$ ). В результате оптимизации по критериям разложения воздействия и согласования витка получены 2 набора параметров поперечного сечения, для которых вычислены формы напряжения разными методами (рисунок 3.4).

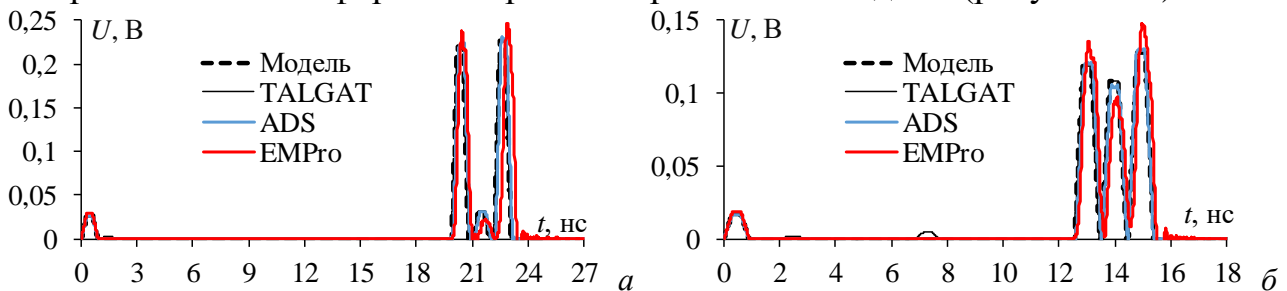


Рисунок 3.4 – Формы напряжения на выходе витка, вычисленные разными подходами, для наборов 1 (а) и 2 (б)

Из рисунка 3.4 видно, что формы напряжения качественно согласуются для каждого из наборов, но наблюдаются количественные отличия. Ослабление сигнала определяется импульсами мод, а отклонение их амплитуд составило менее 5,7 и 12,3% для наборов 1 и 2, что говорит о применимости результатов, полученных по модели (2.5), для оценки ослабления. Выполнена оптимизация витка для его размещения на плате площадью  $S=80\times 80$  мм<sup>2</sup>. В результате он свернут в меандр из 17 и 11 полувитков для наборов 1 и 2. Для них получены формы напряжения с учётом потерь в проводниках и диэлектрике (рисунок 3.5).

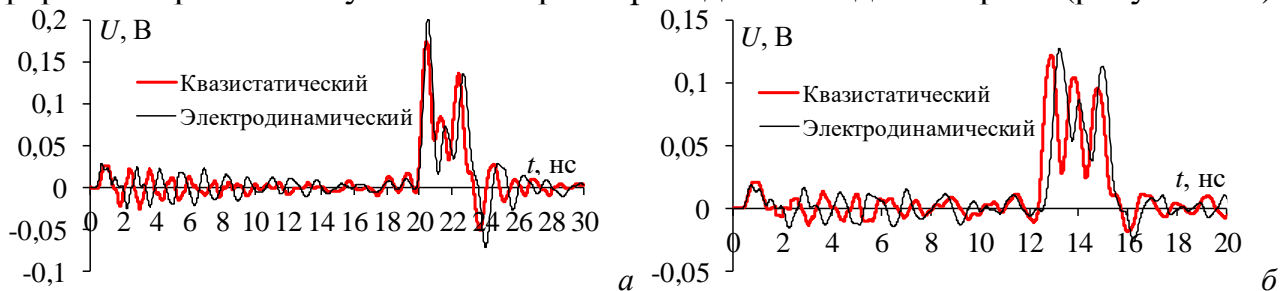


Рисунок 3.5 – Формы напряжения на выходе свернутого витка МЛ, вычисленные разными подходами, для наборов 1 (а) и 2 (б)

Из рисунка 3.5 видно, что учёт влияния потерь приводит к сглаживаю форм импульсов из-за затягивания их фронтов и спадов. Необходимо отметить, что результаты моделирования разными подходами согласуются, однако для набора 1 согласование лучше, как по амплитуде, так и по задержке импульсов. Это может быть обусловлено влиянием отражений. Оценены характеристики воздействия до и после разложения в витке с помощью  $N$ -норм (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Вычисленные нормы для наборов параметров 1 и 2

Набор	Подход	$N_1$	$N_2 \times 10^{-9}$	$N_3 \times 10^{10}$	$N_4 \times 10^{10}$	$N_5 \times 10^6$
		Исходное воздействие	0,5	1,83	3,13	3,13
1	Аналитическая модель (виток)	0,23	0,75	3,03	3,03	7,12
	Квазистатический	0,19	0,53	3,82	5,4	5,97
	Электродинамический	0,2	0,47	3,04	5,22	6,02
2	Аналитическая модель (виток)	0,13	0,43	2,23	2,23	4,61
	Квазистатический	0,13	0,37	2,25	3,23	4,27
	Электродинамический	0,13	0,33	2,6	3,99	4,57

Из таблицы 3.2 видно, что нормы, вычисленные для форм напряжения, полученных разными подходами, согласуются, но они выше для аналитических результатов. Из этого следует, что аналитическое вычисление  $N$ -норм позволяет оценить границу характеристик воздействия на выходе устройств защиты. Это подтверждает применимость аналитического вычисления формы напряжения.

**В разделе 3.4** представлены результаты экспериментальных исследований макетов устройств с модальным разложением и сравнения временных откликов макетов, полученных разными способами, а также оценок  $N$ -норм.

Представлен анализ 2-проводного асимметричного МФ с лицевой связью (рисунок 2.4б). Сначала выполнено предварительное моделирование откликов, полученных по модели (2.3) и численно для случаев, когда  $R_{S2}=R_{L2}=50$  Ом и  $R_{S2}=1$  Ом для имитации КЗ,  $R_{L2}=1$  Мом для имитация ХХ (рисунок 3.6).

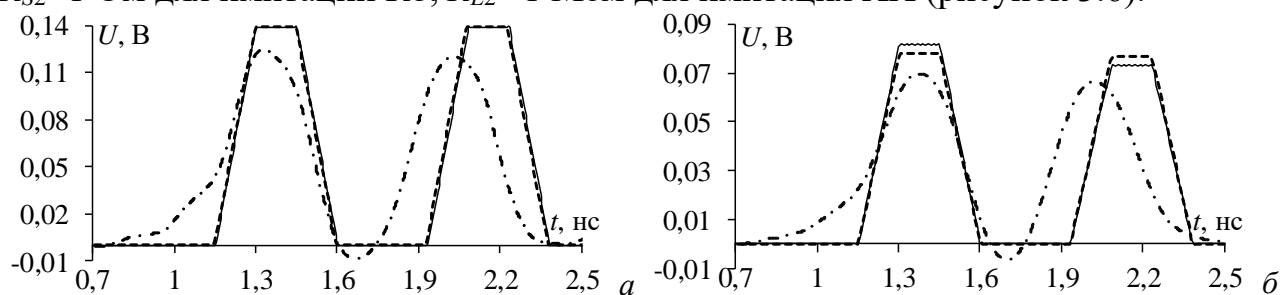


Рисунок 3.6 – Формы напряжения на выходе МФ, полученные аналитически (---) и при квазистатическом (—) и электродинамическом (— · —) моделировании, при  $R_{S2} = R_{L2} = 50$  Ом (а) и  $R_{S2} = КЗ, R_{L2} = ХХ$  (б)

Как видно из рисунка 3.6, результаты, полученные разными способами, согласуются качественно (в конце МФ наблюдаются 2 импульса синфазной и дифференциальной мод). Для случая  $R_{S2}=R_{L2}=50$  Ом максимальное отклонение результатов по амплитуде и по задержкам составило 8 и 29%, а для КЗ-ХХ – 8 и 20%, что приемлемо для аналитического вычисления. Формы напряжения при квазистатическом моделировании совпали. Несмотря на выявленные отличия, модель (2.3) оказалась довольно точна для предварительных оценок.

Изготовлен макет МФ (рисунок 3.7а) и выполнены измерения формы напряжения на его выходе на базе комбинированного осциллографа С9-11 с

измерительным трактом 50 Ом. Для включения макета МФ в тракт применены коаксиально-полосковые переходы, которые вносят искажения в форму напряжения и дополнительную задержку на выходе МФ. Для аналитического вычисления использовано воздействие, оцифрованное с экрана осциллографа. Результаты показаны на рисунке 3.7б

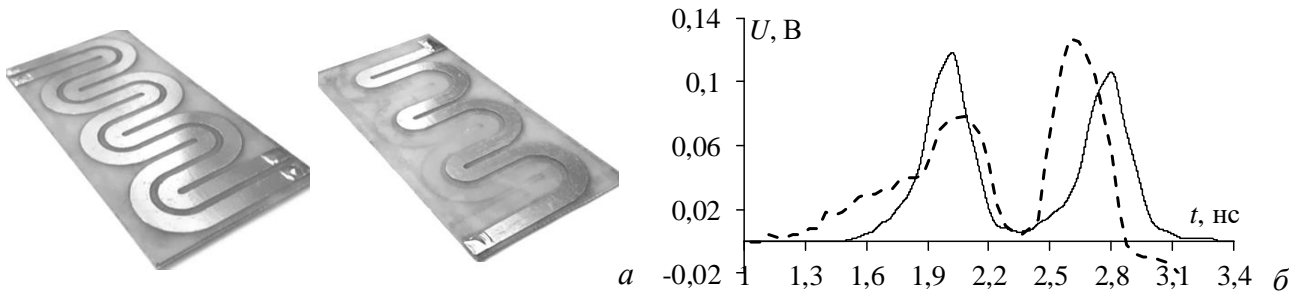


Рисунок 3.7 – Виды сверху и снизу изготовленного макета (а) и формы напряжения (б) на выходе МФ, полученные аналитически (—) и в результате измерений (---)

Максимальное отклонение результатов по амплитуде импульсов 1 и 2 составило 21 и 8,7%, а по задержкам – 2,2 и 3,9%. Таким образом, в результате измерений показано, что аналитическое вычисление формы напряжения на выходе МФ приемлемо для предварительных оценок ослабления МФ.

Выполнен анализ МФ на основе МПЛ с двумя заземленными на концах проводниками, (со схемой из рисунка 2.3б). Для этого изготовлен макет МФ  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> (рисунок 3.8а, б). Векторным анализатором цепей (ВАЦ) E50771 С выполнено измерение частотных характеристик в диапазоне от 10 МГц до 12 ГГц, а затем на их основе вычислены формы напряжения на воздействия: гауссовым импульсом, затухающей синусоидой и синусоидой, модулированной гауссовым импульсом. Перед измерениями выполнена двухпортовая SOLT-калибровка. Полученные разными способами (в том числе по модели (2.4)) формы напряжения показаны на рисунке 3.8в–д. Видно, что все формы напряжения хорошо согласуются.

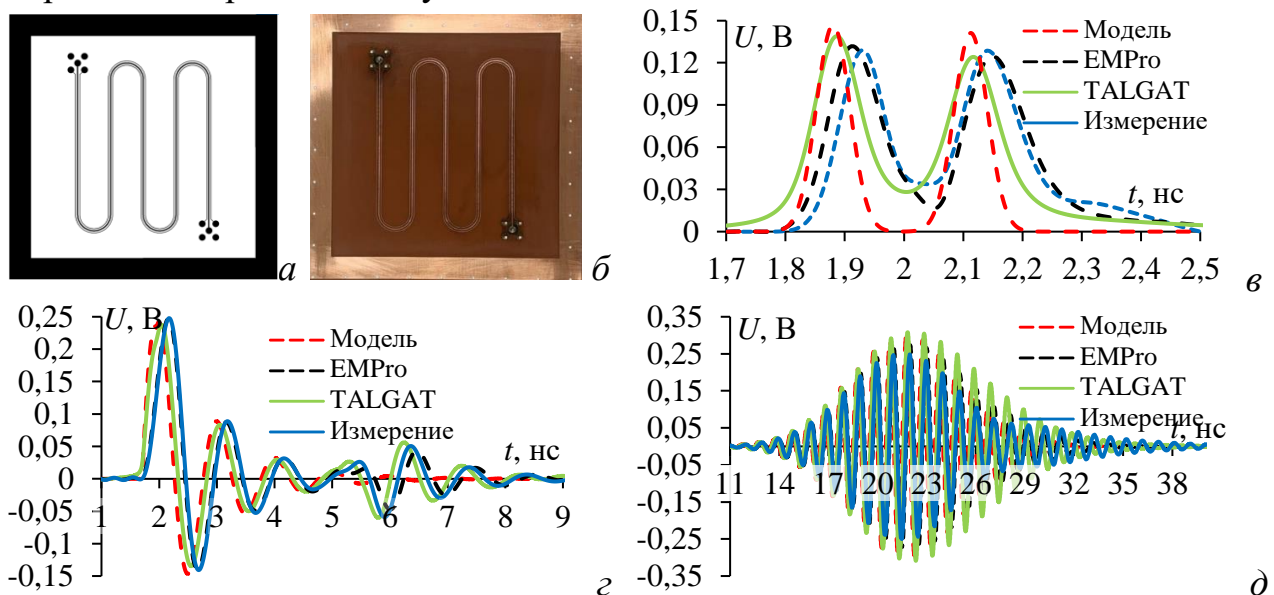


Рисунок 3.8 – Фотошаблон (а) и изготовленный макет (б) МФ и формы выходного напряжения на воздействие гауссова импульса (в), затухающей синусоиды (г) и синусоидой, модулированной гауссовым импульсом (д)

Для количественной оценки форм напряжения использованы  $N$ -нормы (таблица 3.3). Из  $N$ -норм наблюдается их хорошее согласование, что говорит о применимости аналитической модели (2.4) для оценки защитных характеристик с помощью  $N$ -норм, причем на разные формы воздействий.

Таблица 3.3 –  $N$ -нормы, вычисленные для разных воздействий в МФ

Воздействие	Способ	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-10}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
Гауссов импульс	Входное воздействие	0,5	10,61	3,566	3,701	3,552
	Аналитический	0,147	0,333	2,060	2,060	1,446
	Квазистатический	0,139	0,211	3,406	3,681	1,669
	Электродинамический	0,141	0,215	3,491	3,634	1,577
	Измерения	0,129	0,203	3,509	3,685	1,659
Затухающая синусоида	Входное воздействие	0,398	3,177	7,83	3,17	7,81
	Аналитический	0,241	1,87	6,19	2,08	5,11
	Квазистатический	0,237	1,14	6,56	3,04	5,25
	Электродинамический	0,247	1,34	7,64	2,81	5,34
	Измерения	0,248	1,37	7,62	2,76	5,38
Синусоида с гауссовой модуляцией	Входное воздействие	0,5	3,14	3,3	8,06	12,8
	Аналитический	0,298	1,868	2,72	2,45	4,34
	Квазистатический	0,309	1,923	2,53	2,42	4,31
	Электродинамический	0,274	1,743	0,66	2,09	3,78
	Измерения	0,25	1,561	0,87	2,08	3,74

Наконец, разными способами выполнен анализ витка МЛ на основе МПЛ (рисунок 2.4б) со схемой из рисунка 2.1в. Сначала рассмотрен исходный виток МЛ с параметрами для набора 1 из разд. 3.3. На рисунке 3.9 показаны формы выходного напряжения витка, полученные аналитически по модели (2.5) и численной без учёта потерь, при воздействии синусоидой затухающей и модулированной гауссовым импульсом.

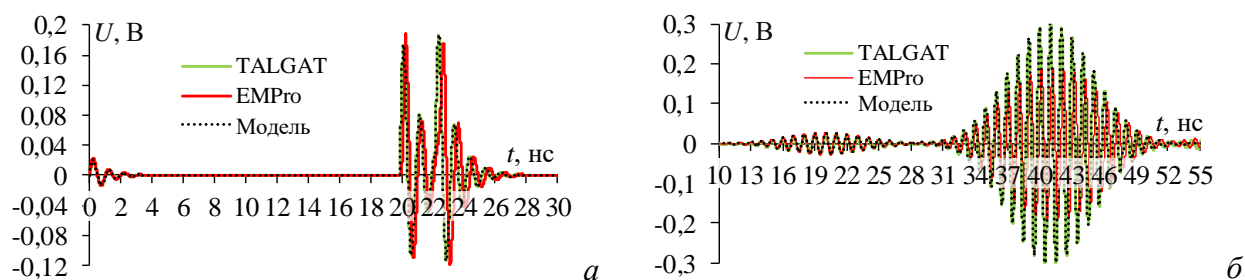


Рисунок 3.9 – Формы напряжения на выходе витка МЛ при воздействии синусоидой затухающей (а) и модулированной гауссовым импульсом (б)

Из рисунка 3.9 видно, что формы выходного напряжения, полученные разными способами, хорошо согласуются. Результаты квазистатического и аналитического вычисления полностью совпали, а их отличие от результатов электродинамического вычисления может быть вызвано распространением высших типов волн и потерь на излучение, что особенно наблюдается по форме синусоиды, модулированной гауссовым импульсом (отличие по амплитуде составило до 30%).

В соответствии с методикой из разд. 3.3, разработан и изготовлен макет витка (рисунок 3.10). Для этого выполнена оптимизация структуры витка по критерию его размещения на площади  $S=80 \times 80$  мм<sup>2</sup>. В результате оптимизации

виток МЛ свернут в меандр из 17 неосновных полувитков со слабой связью. Измерение частотных характеристик витка МЛ выполнено на базе ВАЦ E5071C Agilent Technologies, а затем на их основе вычислены формы напряжения на воздействия из разд. 3.5. Результаты показаны на рисунке 3.10в–д.

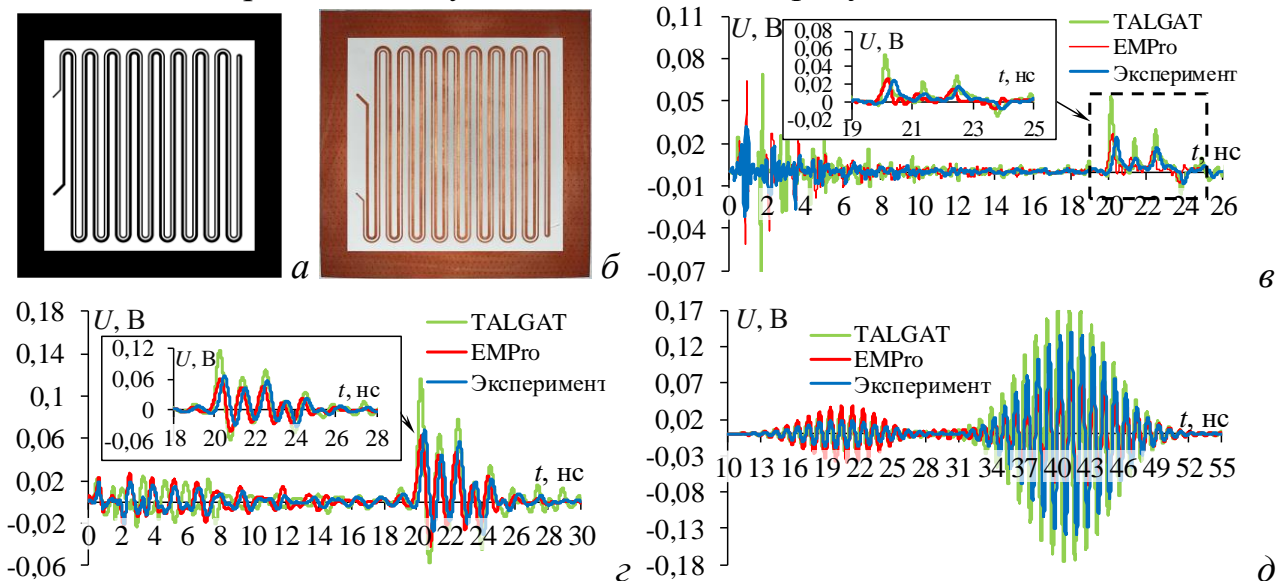


Рисунок 3.10 – Фотошаблон (а) и изготовленный макет (б) витка МЛ и формы выходного напряжения на воздействие гауссова импульса (в), затухающей синусоиды (з) и синусоидой, модулированной гауссовым импульсом (д)

Из форм напряжения видно, что они согласуются качественно, но могут существенно отличаться по амплитуде (тлчия задержек менее 1–5%). Видно, что сворачивание витка в меандр введет к возникновению отражений, которые приводят к искажениям. Для оценки характеристик воздействий использованы  $N$ -нормы (таблица 3.4). Также в таблицу 3.4 сведены нормы, полученные для формы напряжения на выходе исходного витка, вычисленного по модели (2.5).

Таблица 3.4 –  $N$ -нормы, вычисленные для разных воздействий в витке МЛ

Воздействие	Способ	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-10}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
Гауссов импульс	Входное воздействие	0,5	11,3	3,62	3,62	3,55
	Аналитический	0,225	4,8	3,59	3,59	2,26
	Квазистатический	0,069	3,75	4,86	12,03	1,33
	Электродинамический	0,065	2,57	2,22	8,05	1,01
	Измерения	0,032	1,55	2,71	7,85	0,84
Затухающая синусоида	Входное воздействие	0,394	3,24	12,5	3,2	7,8
	Аналитический	0,186	1,39	10,1	3,01	5,13
	Квазистатический	0,116	0,86	8,22	3,72	3,26
	Электродинамический	0,062	0,20	5,37	2,38	2,22
	Измерения	0,068	0,29	5,96	2,1	2,13
Синусоида с гауссовой модуляцией	Входное воздействие	0,5	4,28	15,8	2,81	2,79
	Аналитический	0,303	1,87	9,79	2,03	1,79
	Квазистатический	0,166	1,03	5,37	1,26	0,99
	Электродинамический	0,073	0,52	2,34	0,70	0,49
	Измерения	0,14	0,88	4,48	0,93	0,81

Сравнение  $N$ -норм для откликов, полученных разными способами (в том числе на основе модели (2.5)), показывает, что модель позволяет приблизительно оценить характеристики воздействия после прохождения по витку.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Результаты исследования

1. Получены модели временного отклика на концах двухпроводного МФ. На их основе получены модели нормированных амплитуд импульсов мод на выходе МФ и условия их равенства для общего и ряда частных случаев выбора сопротивлений на концах пассивного проводника МФ. Условия не зависят от окончаний активного проводника МФ, а лишь от параметров поперечного сечения МФ и окончаний его пассивного проводника.

2. Получены модели временного отклика на концах трехпроводного МФ. На их основе получены модели нормированных амплитуд импульсов мод на выходе МФ и условия их равенства для частного случая МФ на основе МПЛ с двумя заземленными на концах пассивными проводниками.

3. Получены модели временного отклика на входе и выходе витка МЛ с асимметричным поперечным сечением и модели нормированных амплитуд 4 импульсов разложения на выходе витка. Показана возможность выравнивания амплитуд импульсов разложения на выходе витка.

4. Проанализировано распространение импульсного сигнала в полосковых устройствах на основе диаграмм координата-время. Сначала это сделано для одиночной линии из двух отрезков для ХХ и КЗ в конце линии, а затем в витке МЛ из двух отрезков. Показано полное совпадение амплитуд и задержек импульсов, полученных с помощью диаграмм координата-время и в результате моделирования формы напряжения.

5. Оценена применимость аналитического вычисления форм напряжения на выходе МФ и МЛ с помощью моделей. Для этого рассмотрены три типовые формы воздействия: импульсный сигнал, затухающая синусоида и синусоида с гауссовой модуляцией. Выполнено сравнение выходных форм напряжения, полученных аналитически, а также квазистатическим и электродинамическим подходами без учета влияния потерь. В совокупности, полученные результаты подтвердили применимость аналитических моделей.

6. Предложена методика синтеза устройств защиты от импульсных СШП воздействий на основе витка МЛ с асимметричным поперечным сечением. Она основана на применении аналитических моделей и численных методов для анализа во временной области и оптимизации.

7. Выполнено сравнение временных откликов в конце асимметричного МФ, полученных аналитически, численно и при измерениях. При сравнении с результатами квазистатического моделирования выявлено практически полное совпадение откликов (отклонение в пределах 2%), электродинамического – не более 8% и 29% по амплитудам и задержкам соответственно, а измерений – до 21 и 3,9% по амплитудам и задержкам. Несмотря на различия, совокупность результатов подтвердила применимость аналитической модели на ранних этапах проектирования МФ.

8. Разными подходами получены формы напряжения на выходе МФ на основе МПЛ с двумя заземленными на концах проводниками на разные формы воздействия. Выявлено их хорошее совпадение, причем отличие аналитических

вычисления и измеренных результатов не более 15%. Вычисленные характеристики воздействия с помощью  $N$ -норм также согласуются.

9. Разными способами получены формы напряжения на выходе витка МЛ на основе асимметричной МПЛ. Их сравнение доказало применимость модели для предварительного анализа распространения помеховых воздействий в витке МЛ без учета потерь. В результате измерений выявлено, что сворачивание витка МЛ в меандр для размещения на плате приводит к большому количеству отражений от концов полувитков, которые ограничивают применение модели. Сравнение  $N$ -норм для форм напряжения, полученных разными способами, показало, что модель позволяет оценить характеристики воздействия.

### **Рекомендации**

1. Разработанные модели временного отклика полосковых устройств на основе модальных явлений могут быть использованы для предварительного вычисления и анализа временного отклика на ранних этапах проектирования.

2. Разработанные модели нормированной амплитуды составляющих сигнала на выходе полосковых устройств на основе модальных явлений могут использоваться для быстрой оценки ослабления импульсного воздействия на выходе устройства за счёт модального разложения без вычисления отклика.

3. Полученные условия равенства амплитуд составляющих сигнала на выходе двух- и трехпроводного МФ могут использоваться в качестве целевой функции при параметрической оптимизации их поперечных сечений.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Применение математических моделей временного отклика, амплитуд составляющих на выходе устройств и условий их равенства для разработки средств автоматизированного синтеза полосковых устройств с модальными явлениями.

2. Применение разработанной методики синтеза пассивных полосковых устройств защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением для разработки, макетирования и измерений устройств.

3. Исследование возможных путей использования рассмотренных структур на практике для защиты от СШП воздействий.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Монография**

1. Суровцев Р.С., **Кенжегулова З.М.** Аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальными явлениями // моногр. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 172 с.

### **Статья в журнале, индексируемом Scopus**

2. Mikola P.V. Analysis of the pulse signal propagation in a turn of a meander line of two segments based on lattice diagrams / P.V. Mikola, **Z.M. Kenzhegulova**, R.S. Surovtsev // Journal of Physics: Conf. Series. – 2022. – Vol. 2291. – P. 1–7.

### **Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus**

3. Sagiyeva I.Y. Modal filters based on a microstrip line with overhead conductors grounded at both ends / I.Y. Sagiyeva, **Z.M. Kenzhegulova**,

T.R. Gazizov, R.S. Surovtsev // 22nd Int. conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM). – Altai (Russia), June 30 – July 4, 2021. – P. 176–179.

4. Sagiyeva I.Y. Analytical models for the time response of a modal filter having a symmetrical pair of passive conductors with grounded ends / I.Y. Sagiyeva, **Z.M. Kenzhegulova**, R.S. Surovtsev // 2022 IEEE Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, 11–13th November, 2022. – P. 1080–1084.

5. **Kenzhegulova Z.M.** Analytical models for calculating the time response in a turn of a meander line of two segments / Z.M. Kenzhegulova, R.S. Surovtsev // 23th Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron materials (EDM). – June 29 – July 3, 2022. – P. 129–134.

#### Статьи в журналах из перечня ВАК

6. **Кенжегулова З.М.** Сравнение временных откликов асимметричного модального фильтра, полученных разными подходами / З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев, Р.Р. Хажобеков // Доклады ТУСУР. – 2022. – № 2 (25). – С. 53–58.

7. Карри С. Методика синтеза пассивных полосковых устройств защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением / С. Карри, **З.М. Кенжегулова**, Р.С. Суровцев // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 1. – С. 90–109.

#### Доклады в трудах отечественных конференций

8. **Кенжегулова З.М.** Анализ коэффициентов отражения мод при согласовании по выходу связанной линии с помощью П- и Т-образных схем / З.М. Кенжегулова, Рыжова М.В. // Межд. научно-технич. конф. «Научная сессия ТУСУР», Томск. – 22–24 мая 2019. – Ч. 2. – С. 17–20.

9. **Кенжегулова, З.М.** Аналитические модели для вычисления временного отклика витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением // З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев // Материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск. – 2020. – Ч. 1. – С. 286–289.

10. **Кенжегулова З.М.** Аналитические выражения для вычисления временного отклика двух последовательно соединенных отрезков связанных линий при согласовании по выходу / З.М. Кенжегулова, Е.Б. Черникова // VI Всерос. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и когнитивная электросвязь», Екатеринбург. – 2020. – С. 29–33.

11. Микола П.В. Анализ распространения импульсного сигнала в одиночной линии передачи из двух отрезков на основе диаграммы координата-время / П.В. Микола, **З.М. Кенжегулова**, Р.С. Суровцев // XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск. – 2021. – С. 37–40.

12. **Кенжегулова З.М.** Обзор аналитических моделей для вычисления временного отклика в полосковых устройствах защиты // Междунар. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР – 2021». 2021, Томск, 19–21 мая 2021. – Ч. 2. – С. 61–64.