

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

На правах рукописи



Медведев Артём Викторович

Временные и частотные характеристики
структур с модальным резервированием
до и после отказов их элементов

Специальность 2.2.13

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Томск 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ РЕЗЕРВИРУЕМЫХ СИСТЕМ: ОБЗОР	9
1.1 Актуальность	9
1.1.1 Причины отказов элементов печатных плат	9
1.1.2 Методы и меры по устранению рисков для функциональной безопасности, связанных с электромагнитными помехами	13
1.2 Модальное резервирование	14
1.2.1 Однократное модальное резервирование	15
1.2.2 Трехкратное модальное резервирование	19
1.3 Подходы к исследованию временных и частотных характеристик печатных плат	21
1.3.1 Квазистатическое моделирование	22
1.3.2 Электродинамическое моделирование.....	23
1.3.3 Экспериментальное исследование.....	24
1.3.4 Систематизация методов исследования.....	25
1.4 Цель и задачи работы.....	26
2. ОДНОКРАТНОЕ МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ	28
2.1 Исследования характеристик структур с однократным модальным резервированием с однослойной трассировкой до и после отказов их элементов	28
2.1.1 Экранированная однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью.....	28
2.1.2 Однослойная трассировка резервированных цепей с боковой связью.....	44
2.2 Разработка новых способов однократного модального резервирования с двуслойной трассировкой проводников	59
2.2.1 Двуслойная трассировка резервированных цепей с боковой связью на противоположных сторонах печатной платы	59
2.2.2 Экранированная двуслойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью.....	62
2.2.3 Двуслойная трассировка резервированных цепей с боковой связью в двуслойном диэлектрике	65
2.3 Основные результаты раздела.....	73
3. ДВУКРАТНОЕ МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ	75
3.1 Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием	75

3.2	Исследование порядка переключения после отказов для трехпроводной структуры с модальным резервированием.....	77
3.3	Основные результаты раздела.....	82
4.	ТРЕХКРАТНОЕ МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ	84
4.1	Предварительный анализ структур с трехкратным модальным резервированием с учетом отказов их элементов	84
4.1.1	Геометрические и схемные модели структур с трехкратным модальным резервированием до и после отказов	84
4.1.2	Одновариантный анализ структуры	89
4.1.3	Многовариантный анализ структуры.....	94
4.1.4	Основные результаты подраздела	102
4.2	Моделирование структур с трехкратным модальным резервированием до и после отказов на концах и вдоль проводников	103
4.2.1	Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием	104
4.2.2	Структура с исполнением опорного проводника в центре	105
4.2.3	Структура с исполнением опорного проводника сверху и снизу (многослойная печатная плата)	110
4.2.4	Структура с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов	114
4.2.5	Основные результаты подраздела	119
4.3	Экспериментальные исследования структур с трехкратным модальным резервированием.....	121
4.3.1	Прототип печатной платы с исполнением опорных проводников сверху и снизу	121
4.3.2	Прототип печатной платы с исполнением опорного проводника в центре	133
4.3.3	Разработка и экспериментальные исследования прототипов печатной платы с опорным проводником в виде боковых полигонов.....	137
4.3.4	Основные результаты подраздела	162
4.4	Основные результаты раздела.....	163
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	167
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	168
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ) КОПИИ ДОКУМЕНТОВ	181

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) подвержена сбоям, неисправностям и отказам, вызванными электромагнитными помехами (ЭМП). Следующие причины делают РЭА менее устойчивой к ЭМП: уменьшение минимального размера компонента для увеличения плотности монтажа, снижение напряжения питания для уменьшения энергопотребления и рассеивания тепла, более жесткая электромагнитная обстановка из-за увеличения количества и мощности устройств, создающих ЭМП. Особо опасны кондуктивные сверхширокополосные (СШП) помехи, которые имеют высокую амплитуду, малую длительность и широкий спектр. СШП помехи могут проникать в РЭА по цепям питания и приводить к выгоранию компонентов, приводя к выходу РЭА из строя. Функциональная безопасность (ФБ) РЭА при воздействии ЭМП, в частности, СШП помех, крайне важна. Поэтому, необходимо использовать подходы, при которых методы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) интегрированы в конструкцию РЭА, схемотехнику электронных схем, электронную компонентную базу и связаны с методами обеспечения ФБ. Таким образом, разработка этих подходов актуальна.

Степень разработанности темы. Ряд публикаций последних лет посвящен вопросам обеспечения ФБ РЭА при воздействии ЭМП. Отметим некоторых исследователей, занимавшихся ими. Armstrong E.K. занимался снижением рисков ФБ, которые могут быть вызваны ЭМП. Borgeest K. занимался этими вопросами для автомобильной электроники. Бельгийский коллектив ученых под руководством Pissoort D. и Boydens J. активно исследуют возможность обеспечения ФБ при воздействии излучаемых ЭМП за счет электромагнитной неоднородности резервируемых каналов. Этими вопросами занимаются также российские исследователи: Абрамешин А.Е., Акбашев Б.Б., Аполлонский С.М., Гизатуллин З.М., Кечиев Л.Н. Методология достижения ФБ электрических и электронных систем, включая оборудование, в отношении ЭМП описана в стандартах, переведенных на русский язык, серии ИЕС/TS 61000. В зарубежном стандарте IEEE P1848/D7 представлены практические методы и меры по управлению ФБ и другими рисками, связанными с ЭМП. Группа под руководством Газизова Т.Р. разработала технологию модального резервирования (МР) РЭА, использующую компоновку и трассировку проводников резервируемых цепей для защиты РЭА от СШП помех за счет модальной фильтрации. Разработка устройств с МР – актуальная и сложная задача, так как требует выполнения схемотехнического, квазистатического и электродинамического анализов разработанных электронных схем с точки зрения реализации МР. Отметим исследователей, которые рассматривали МР в своих диссертациях. Шарафутдинов В.Р. разработал несколько способов однократного и трехкратного МР, выполнил их первые

исследования и разработал первый прототип печатной платы (ПП) с МР. Черникова Е.Б. выполнила первые теоретические исследования зеркально-симметричных структур с трехкратным МР с исполнением опорных проводников в центре, сверху и снизу, а также в виде боковых полигонов. Жечев Е.С. предложил экспериментально-расчетную методику для анализа структур с модальной фильтрацией и апробировал ее на первом прототипе ПП с МР. Самойличенко М.А. предложила способы трассировки двусторонней ПП для цепей с МР и уменьшенным количеством проводников. Следующим шагом в исследовании структур с МР является определение границ их применения с учетом отказов их элементов.

Цель работы – выявить возможности совершенствования одно-, двух- и трехкратного МР до и после отказов элементов за счет новых способов компоновки, трассировки и переключения резервируемых цепей.

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

1. Исследовать характеристики структур с однократным МР с однослойной трассировкой до и после отказов их элементов.
2. Разработать новые способы однократного МР с двуслойной трассировкой.
3. Разработать и исследовать способ двукратного МР.
4. Исследовать характеристики структур с трехкратным МР до и после отказов их элементов.

Научная новизна

1. Предложены три новых способа компоновки и трассировки печатных плат с однократным модальным резервированием для ослабления сверхширокополосной помехи, отличающихся наличием двух сигнальных слоев для упрощения трассировки проводников при большом количестве элементов.

2. Предложен способ двукратного модального резервирования цепей на двуслойной печатной плате с дополнительным диэлектриком между проводниками, отличающийся тем, что три проводника с одинаковой шириной расположены на одинаковых расстояниях друг от друга, а в качестве резервируемого проводника выбран средний.

3. Разработан и экспериментально подтвержден оптимальный порядок переключения цепей с трёхкратным модальным резервированием, отличающийся последовательной заменой резервируемого проводника, после отказа элементов на его концах, резервным проводником с минимальным уровнем максимального напряжения импульсов разложения.

4. Выполнено исследование частотных характеристик структур с одно- и трехкратным модальным резервированием, отличающееся учетом отказов их элементов.

Теоретическая значимость

1. Изучены особенности влияния параметров поперечного сечения на временные и частотные отклики структур с однократным модальным резервированием.
2. Показано преимущество проектирования печатных плат на основе новых способов двуслойной трассировки перед способами однослойной трассировки.
3. Приведены оценки ослабления сверхширокополосных помех в структурах с однократным и трехкратным модальным резервированием.

Практическая значимость

1. Разработаны прототипы с трассировкой проводников с боковой и лицевой связями на специальных измерительных печатных платах для исследования на излучаемые эмиссии и восприимчивость к излучениям.
2. Внедрены результаты квазистатического моделирования распространения сверхкороткого импульса в цепях блока цифровой обработки сигнала и в цепях источника питания системы автономной навигации космического аппарата в АО «ИСС», г. Железногорск (акт внедрения).
3. Получены 8 патентов на изобретения (способы).

Методология и методы исследования. Используются компьютерное 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. Предложенные три новых способа компоновки и трассировки цепей с модальным резервированием позволяют выполнить их трассировку на двух слоях печатной платы и уменьшить амплитуду распространяющегося сверхширокополосного импульса в цепях с модальным резервированием не менее чем в 2 раза.
2. Предложенный способ двукратного модального резервирования позволяет уменьшить амплитуду распространяющегося сверхширокополосного импульса до отказов в 1,7 раза, после первого отказа – в 2 раза, а второго – в 2,1 раза.
3. После отказов элементов в структуре с трехкратным модальным резервированием, порядок переключения проводников, оптимальный по критерию минимального напряжения на выходе, позволяет увеличение ослабления импульса помехи за счет её разложения: для структуры с опорными проводниками в виде боковых полигонов – до 21% после первого отказа и 13% после второго.

4. Отказы элементов структур с одно- и трехкратным модальным резервированием изменяют частотные характеристики структур: частоты среза и первого резонанса могут изменяться на десятки процентов.

Достоверность результатов основана на корректном применении теории многопроводных ЛП, согласованности результатов моделирования и эксперимента, использовании современных методик измерения сертифицированными приборами.

Использование результатов

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

2. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РНФ 19-19-00424, 2019–2021 гг., 2022–2023 гг.

3. НИР «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей», грант РНФ 20-19-00446, 2020–2022 гг., 2023–2024 гг.

4. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования. Научно-исследовательская лаборатория фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС), проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.

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

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: РНФ (гранты 19-19-00424, 20-19-00446, в т.ч. на их продолжение); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2022 г.; на назначение стипендий Президента и Правительства РФ в 2022–2023 гг.

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций:

1. Межд. научно-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», 2018, 2019, 2022, 2023 г.
2. Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 2019 г.
3. Межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2019, 2020, 2022 г.

4. Межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2020, 2023 г.

5. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Новосибирск, 2017, 2019 г.

5. Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Алтай, 2021 г.

6. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Омск, 2021 г.

7. Ural symposium on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT), Екатеринбург, 2021 г.

8. Int. ural conf. on electrical power engineering (UralCon), Магнитогорск, 2022 г.

Публикации. Результаты опубликованы в 48 работах (9 без соавторов).

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	4
Статья в журнале, индексируемом Scopus (Q1)	2
Статья в журнале, индексируемом Scopus (Q2)	2
Статья в журнале, индексируемом в WoS и Scopus	7
Доклад в трудах конференции, индексируемой в WoS и Scopus	8
Доклад в трудах отечественной конференции	14
Тезисы в трудах отечественной конференции	3
Патент на изобретение	8
ИТОГО:	48

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список источников из 132 наименований. Объем диссертации с приложением – 194 с., в т.ч. 181 рис. и 68 табл.

Личный вклад. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или при его участии. Личный вклад состоит в участии на всех этапах исследований и непосредственном участии в получении исходных данных. Их обработка и интерпретация выполнены совместно с соавторами публикаций. Непосредственный вклад автора состоит в выполнении квазистатического моделирования, разработке прототипов. Измерения характеристик прототипов выполнены совместно с *Е.С. Жечевым*.

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В разделе 1 выполнен обзор методов и подходов к обеспечению помехозащищенности резервируемых систем, а также сформулированы цель и задачи работы. В разделе 2 выполнено исследование известных способов однократного МР, а также разработаны и исследованы новые способы. В разделе 3 выполнена разработка и исследование способа двукратного МР. В разделе 4 исследован порядок переключения после отказов в структурах с трёхкратным МР. В Приложении А приведены копии актов внедрения, патентов, дипломов, а также свидетельств.

1. ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ РЕЗЕРВИРУЕМЫХ СИСТЕМ: ОБЗОР

1.1 Актуальность

В современных стандартах ФБ, таких как IEC 61508 (общие) [1] и ISO 26262 (автомобильные) [2], предлагается множество методов обеспечения отказоустойчивости (сгруппированы по категориям в [3]). Однако, не все методы обеспечения отказоустойчивости способны уменьшить влияние ЭМП [4]. Совершенствование этих методов, которые основаны на внутреннем ресурсе РЭА, является актуальной задачей обеспечения ФБ при воздействии ЭМП. Поэтому, далее сначала приводятся причины отказов элементов ПП: от технологических дефектов до ЭМП. Затем рассматриваются методы и меры по устранению рисков для ФБ, связанных с ЭМП.

1.1.1 Причины отказов элементов печатных плат

Процесс создания надежной РЭА должен затрагивать все стадии производства аппаратуры, в т.ч. разработку ПП. В [5] предложена классификация технологических дефектов ПП. В [6] представлены основные виды дефектов сквозного металлизированного отверстия (СМО) в ПП высокой плотности. В [7] предложена классификация дефектов паяных соединений. Пустота в гальванике и трещина в покрытии СМО непосредственно приведут к электрическому обрыву, в то время как расслоение и трещина в смоле могут привести к скрытым функциональным отказам, которые не выявляются системами обнаружения отказов [8]. Так в [9] приводится пример отказа при обрыве / холостом ходу (XX), вызванном разделением внутреннего слоя при дефекте СМО. При этом, большинство этих дефектов необходимо предвидеть на стадии разработки ПП.

В работе [10] показано, что существует корреляция между кривизной платы (и ее поверхностной деформацией) и отказами электронных элементов. Неправильное размещение элементов на ПП и неправильный контроль температуры могут привести к тепловому дисбалансу в ПП [11]. Если ПП не сбалансирована должным образом, характеристики ПП и функциональность элементов изменятся [12]. Частота отказов электронных устройств экспоненциально увеличивается с повышением рабочей температуры. Перегретые компоненты и плохо работающие электронные устройства могут стать источником излучаемых ЭМП на ПП. Должны использоваться: предварительный термический анализ, оптимизация размещения

элементов и улучшенный механизм отведения тепла, чтобы снизить вероятность проблем ПП с излучением ЭМП.

Тепловое расширение в корпусах микросхем вызывает большое количество проблем с надежностью в микроэлектронной промышленности [13]. Также первостепенное значение имеет необходимость учитывать межфазные напряжения, которые приводят к отказам линий передач (ЛП). Соответствующие межкомпонентные соединения позволяют компенсировать напряжения сдвига и изгиба в интерфейсе микросхемы и корпуса и, следовательно, увеличивают долговечность устройства.

Все более распространенным становится использование ПП с высокой плотностью монтажа элементов [14]. Уменьшение расстояния между соседними проводниками делает ПП более подверженной электрохимической миграции, что в конечном итоге приводит к повреждению диэлектрика. Когда переносимая по воздуху пыль оседает на ПП в сильно загрязненной среде, критическая влажность, концентрация ионов и локальная температура на поверхности ПП изменяются, что может привести к отказу.

В [15] представлены механизмы отказа в ПП с высокой плотностью тока. Нагрев медных проводов известен как одна из основных причин отказа сильноточных ПП. Показано, что исследуемая ПП вышла из строя при температуре 300-350 С, при этом, для стеклотекстолита FR4 максимальная рабочая температура составляет 120°C (температура стеклования материала стеклотекстолита FR4).

В [16] исследованы испытательные ПП с силиконовым конформным покрытием, а также исследованы влияния загрязнения и проводящих частиц на покрытые ПП. Было измерено напряжение пробоя для ряда тестовых ПП для оценки характеристик покрытия. Наблюдения подтвердили, что пятно загрязнения играет важную роль в возникновении частичных разрядов или разряда на ПП с покрытием.

Паяный соединитель для ПП представляет собой соединение с высоким риском отказа среди различных типов соединителей [17], поскольку между контактными площадками ПП и контактами соединителя должны быть сформированы дополнительные паяные соединения, а в процессе сборки будут воздействия окружающей среды, включая механические, термические и химические факторы [18]. В [19] выполнен анализ отказов паяных BGA-соединений. Показано, что трещина в нескольких паяных соединениях вызвала отказ узла. Распределение трещин в паяных соединениях указывает на то, что трещина может быть связана с внешним механическим напряжением, которое возникло в процессе раскола платы с V-образным вырезом.

В [20] исследовано влияние низкого давления окружающей среды на отказы ПП, вызванное повторяющимися импульсами напряжения. Накопленный заряд, доведший до отказа,

и время до отказа были измерены при атмосферном и низком давлении, а также для различных температур. Основные выводы таковы:

– Как накопленный заряд, доведший до отказа, так и время до отказа, увеличиваются при более низких давлениях. Низкое давление увеличивает срок службы ПП.

– При низком давлении повышенная температура мало влияет на накопленный заряд, но приводит к значительному сокращению времени до отказа. Температура является важным фактором надежности ПП при низких давлениях.

– Накопленный заряд увеличивается с уменьшением интервала между импульсами, что ускоряет отказ. Очевидно, что для промышленного применения при низком давлении следует обращать внимание на импульсы с высокой частотой повторения.

– При низких давлениях уменьшение расстояния между проводниками вызывает уменьшение необходимого накопленного заряда, но увеличивает время до отказа. Таким образом, при меньших расстояниях надо повысить надежность изоляции ПП, работающих в среде с низким давлением.

Основными рецепторами, воспринимающими воздействие ЭМП, являются межсоединения, в том числе, токопроводящие дорожки ПП [21]. Именно на них наводятся ЭМП. Затем эти ЭМП вызывают отказы РЭА. Таким образом, при возникновении ЭМП в межсоединениях РЭА могут возникнуть три типичных эффекта, которые вызывают нарушения в работе электронных устройств:

- 1) необратимые отказы некоторых элементов;
- 2) переход активных элементов в режим насыщения;
- 3) ошибки при передаче цифровых данных.

На рисунке 1.1 приведена классификация источников ЭМП, которые приводят к сбоям, частичным и полным отказам элементов. Для различения источников ЭМП используются пять категорий [22]. Первое различие источников ЭМП заключается в том, что они могут быть искусственными или естественными. Искусственные ЭМП исходят от искусственных устройств и инфраструктуры. Молния является примером естественной ЭМП. Во-вторых, различают узкополосные и широкополосные ЭМП. В-третьих, ЭМП могут быть когерентными или некогерентными. Когерентные ЭМП определяются как сигналы с четко определенным соотношением между амплитудой, частотой и фазой. В-четвертых, ЭМП может быть кондуктивной или излучаемой. Кондуктивная ЭМП распространяется по электропроводящим путям, таким как заземляющие плоскости или провода. Все кондуктивные ЭМП классифицируются как излучаемые. В-пятых, преднамеренные и непреднамеренные ЭМП.

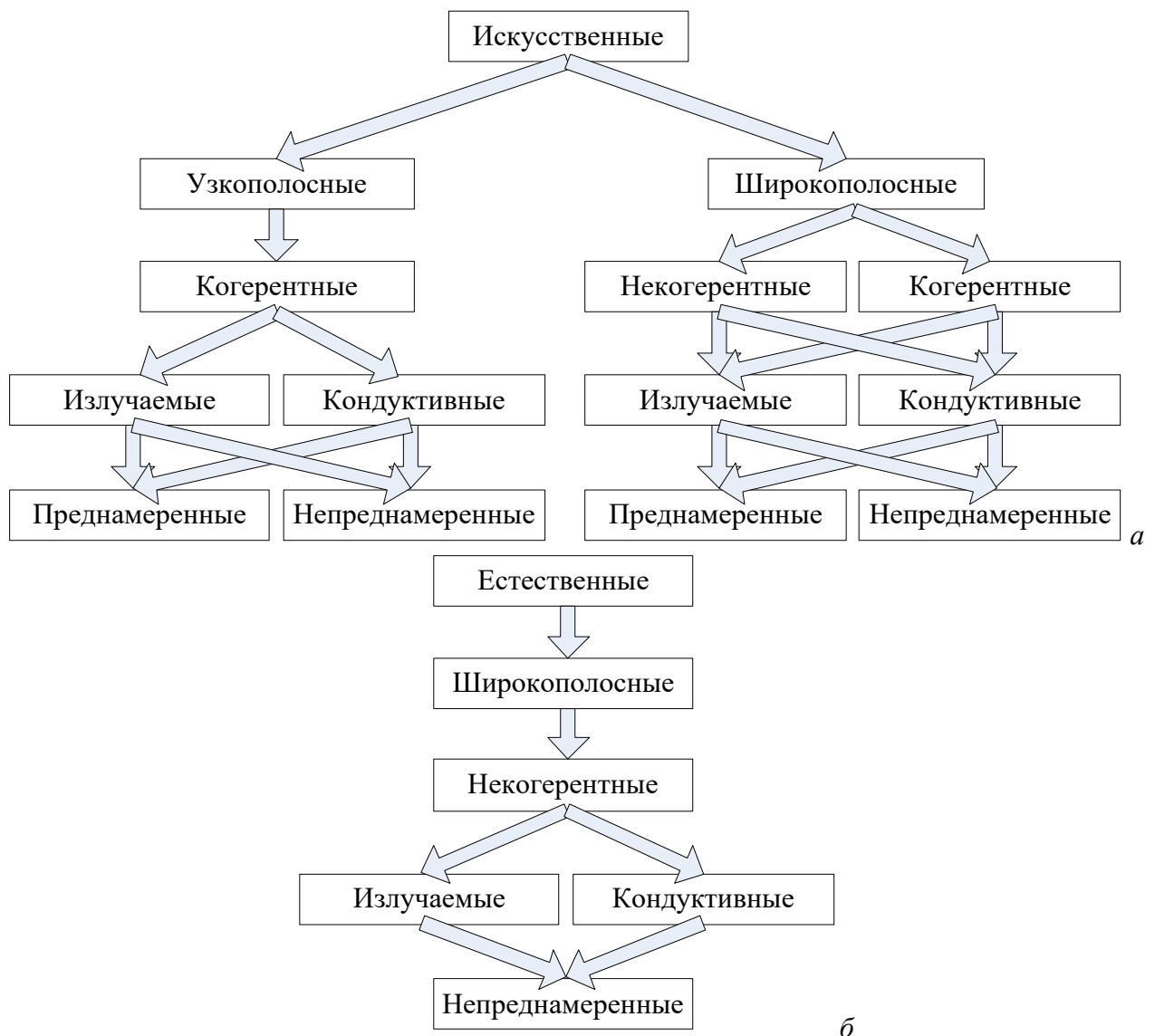


Рисунок 1.1 – Классификация источников искусственных и естественных ЭМП [22]

Рассмотрим распространенные виды искусственных кондуктивных помех, такие как электростатический разряд (ЭСР) и СШП помехи. ЭСР оказывает ощутимое влияние на РЭА [23]. Из-за уменьшения размеров электронных элементов, компонент и, следовательно, система, становятся более восприимчивыми к ЭСР. Для защиты системы от отказа под воздействием ЭСР клеммы ввода/вывода оборудованы защитой от ЭСР, но в некоторых случаях ток ЭСР может проходить через экран внешнего порта, например, экран USB или HDMI. В таких конкретных случаях большая часть тока напрямую достигает заземления ПП, поэтому схема защиты от ЭСР на клемме ввода-вывода может совсем не помочь. В таких случаях ЭСР может повлиять на функционирование интегральной схемы и вызвать такие проблемы, как перезагрузка и зависание дисплея, называемые скрытым функциональным отказом, и в худшем случае может привести к необратимому повреждению системы, называемому жестким отказом, который на структурном уровне можно описать в виде короткого замыкания (КЗ) и ХХ межсоединений. Жесткий отказ системы легко обнаружить, потому что из-за необратимого

повреждения место отказа легко отследить, но в случае мягкого отказа трудно определить точное место, чувствительное к ЭСР, поскольку система восстанавливает свое надлежащее функционирование после перезапуска. В [23–25] предлагается новая схема обнаружения скрытых функциональных отказов, вызванных ЭСР.

СШП помехи – особенно опасный вид кондуктивных помех, которые могут приводить к внутренним повреждениям, электрическим и диэлектрическим пробоям и выгоранию проводников и компонентов РЭА [26, 27]. СШП помехи имеют высокое напряжение, малую длительность и широкий спектр. Несмотря на небольшую энергию таких ЭМП их влияние на типовые РЭА может быть значительным. Классические устройства защиты РЭА от помех обладают рядом существенных недостатков: низкие быстродействие и эксплуатационные характеристики, большие масса и габариты.

Таким образом, на основании выполненного обзора выявлено, что рассмотренные выше причины приводят к отказам на концах и вдоль проводников, а именно, к КЗ проводника на землю или на соседний проводник либо к обрыву проводника ХХ.

1.1.2 Методы и меры по устранению рисков для функциональной безопасности, связанных с электромагнитными помехами

Большинство из описанных выше причин отказов возможно обнаружить. В системах, критически важных для безопасности, для обеспечения правильного поведения компонента используется контроль. Для этого используются коммерческие готовые решения [28], то есть специальные датчики, которые обнаруживают отказ. Часто этот метод используется в автомобильной промышленности, когда сбой или отказ обнаруживается и сообщается водителю [29].

Методы обнаружения и исправления ошибок будут активно искать и пытаться исправить вызванные неисправности в системе [30]. Какой бы метод ни использовался, главная цель – убедиться, что система знает о возникновении неисправностей, и предотвратить возникновение неисправностей, которые могут нанести вред людям и окружающей среде. Процесс обеспечения отказоустойчивости состоит из трех отдельных этапов. Во-первых, неисправность должна быть обнаружена. Без обнаружения неисправности могут оставаться в системе и сохранять способность вызывать сбои. Когда неисправность обнаружена, она должна быть локализована в пределах той части или модуля системы, где она возникла. Третьим этапом является устранение неисправности, для которого могут быть использованы различные методы восстановления.

Резервирование – Это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций [31]. Оно используется в двух возможных конфигурациях: дублирование и дублирование с распределением нагрузки. В первом случае дублирующие (резервные) компоненты не принимают активного участия в работе системы. Только когда основной (резервируемый) компонент выходит из строя, резервный берет на себя его функции. Сам резервный компонент может находиться в режиме горячего или холодного резервирования. Конфигурации горячего резервирования потребляют энергию, но сразу же начинают работать. Холодному резерву требуется время на инициализацию, прежде чем он сможет выполнить свою функцию обхода отказа. В конфигурации с распределением нагрузки резерв активно участвует в работе. Однако, чтобы обеспечить обход отказа, резервная система не должна работать на полную мощность.

При распространении ЭМП в РЭА, упомянутого выше резервирования может оказаться недостаточно. ЭМП следует рассматривать как систематический отказ, поскольку конкретное воздействие приведет к конкретному поведению системы. Когда эта система не приспособлена для борьбы с ЭМП, воздействие рассматривается как отказ по общей причине, когда на все узлы системы влияет одна и та же причина отказа. Чтобы справиться с детерминированной и общей причиной ЭМП, избыточность может быть расширена электромагнитным разнообразием [32], чтобы создать различное поведение под воздействием одного и того же ЭМП. Это разнообразие достигается различными методами, такими как использование различных архитектур (процессоров, памяти), инверсия данных и сигналов, различная реализация одного и того же алгоритма и десинхронизация компонентов, как в аппаратном, так и в программном обеспечении. Один из вариантов обеспечения электромагнитного разнообразия – это пространственное разнесение резервируемых ПП. В [33, 34] показано, что от расположения резервируемых проводников или ПП относительно друг друга зависит как надежность, так и обеспечение ЭМС. Так, применительно к ПП, когда резервируемый и резервный элементы расположены произвольно по отношению друг к другу, резервируемая схема размещается на одном участке ПП, а резервная на соседнем. Часто резервируемая схема размещается на одной ПП (резервируемой), а резервная – на другой (резервной), причем ПП располагаются произвольно относительно друг друга.

1.2 Модальное резервирование

На основе холодного резервирования разработан новый подход к компоновке и трассировке резервируемых проводников одноименных цепей для ослабления влияния ЭМП

помех малой длительности, называемый модальным резервированием (МР). В [35, 36] рассмотрены способы однократного и трехкратного МР, которые используют резервирование замещением с ненагруженным резервом для обеспечения ЭМС. Это достигается за счет такого выполнения резервирования, при котором резервируемая и резервные цепи образуют модальный фильтр (МФ) (устройство, позволяющие путем применения связанных ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением делить СШП импульс на импульсы меньшей амплитуды из-за различия погонных задержек мод (Δt)). МР уменьшает габариты резервируемых и резервных систем. Используя МР, можно добиться уменьшения восприимчивости рассматриваемых цепей к внешним кондуктивным ЭМП и уменьшения уровня кондуктивных ЭМП от этих цепей. Это достигается за счет того, что помеховый импульс, длительность которого меньше абсолютного значения Δt четной и нечетной мод в структуре связанной ЛП, образованной парой проводников резервируемой и резервной цепей, подвергается модальным искажениям, следствием которых является модальное разложение на импульсы меньшей амплитуды (при рассмотрении сигнала во временной области). Кратность резервирования – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых [37].

Различают однократное МР, кратность которого равна единице (дублирование), и многократное, кратность которого больше единицы. Многократное применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокие показатели надежности. Существуют способы однократного и трехкратного МР. Далее представлены их анализ и систематизация.

1.2.1 Однократное модальное резервирование

Здесь представлен обзор способов однократного МР для ПП с однослойной трассировкой проводников. При этом под резервируемые и резервные проводники отдается один слой (общий или отдельный для резервируемых цепей).

1.2.1.1 Однослойная трассировка резервированных цепей с боковой связью

На рисунке 1.2а представлена базовая структура однослойной трассировки резервированных цепей с боковой связью. Подобная реализация обеспечивает относительно низкие значения Δt (примерно до 2 нс/м) [38–41]. Реализация способа не требует сложного технического процесса изготовления ПП. Контроль значений Δt можно осуществлять относительно малым набором параметров (длина ЛП, ϵ_r подложки). Ввиду слабой боковой связи можно добиться ослабления импульса помехи немногим более чем в 2 раза на отрезок.

На рисунке 1.2б представлена реализация этого способа трассировки с диэлектрическим заполнением между резервируемым и резервным проводниками [41–43]. Подобная реализация обеспечивает более высокое значение Δt и возможность его контроля за счет выбора значений

относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика (ϵ_{r2}). С учетом реальных параметров стека ПП значение Δt варьируется в диапазоне 0,19...3,5 нс/м, а первая частота резонанса (f_0) в диапазоне 0,143... 2,7 ГГц. Данный способ позволяет контролировать то, какая мода будет распространяться быстрее. Несмотря на боковую связь, коэффициент ослабления может быть существенно более 2 раз на отрезок. Однако, нанесение дополнительного покрытия для заполнения промежутка между резервируемой и резервной проводниками усложняет процесс производства ПП. Реализация обоих вариантов удобна только с компонентами, где резервная и резервируемая часть выполнены в одном корпусе, а выводы – симметрично либо попарно. В противном случае возникают проблемы с трассировкой.

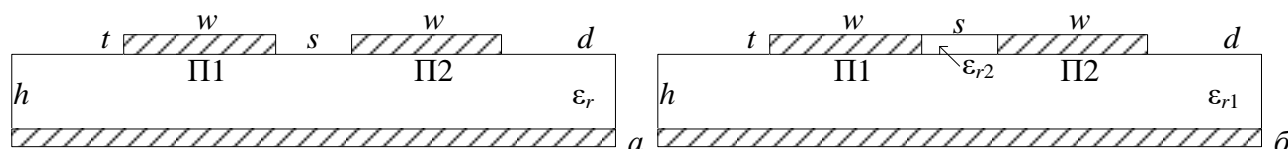


Рисунок 1.2 – Структура однослойной трассировки резервированных цепей с боковой связью без (а) и с (б) диэлектрическим заполнением между резервируемым и резервным проводниками П1 и П2

Микрополосковые структуры с модальной фильтрацией с боковой связью широко исследованы, в том числе и двухпроводные [44]. Например, на рисунке 1.3 представлен пример одного из таких прототипов. Так как ранее такие структуры рассматривались для реализации готовых защитных устройств, то есть их длина и выбор компонентной базы в нагрузках не важны, устройство выполнено на подложке из FR4, и, чтобы было разложение импульса помехи, длина ЛП должна быть около 1 м. Таким образом, результаты такого эксперимента не подходят для задач МР, так как длина резервируемых и резервных цепей часто не превышает 40 см, а в большинстве случаев длины максимально минимизируются. Также важно иметь доступ к пассивным проводникам, для произвольного задания граничных условий на их концах, что в данных реализациях не учитывается.



Рисунок 1.3 – Фотография прототипа двухпроводного МФ с боковой связью

1.2.1.2 Однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью и полигонами

На рисунке 1.4 представлена однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью и полигонами. Отличительной особенностью данного способа является то, что верхний и нижний слои двусторонней ПП заполнены полигонами, являющимися опорными слоями для резервируемой и резервной трасс [45]. В данной структуре резервируемым и резервным проводниками являются П1 и П2, соответственно. Опорные проводники можно

реализовывать по разному, например, О1 опорный для П1, а О3 опорный для П2 или О1 опорный для П1, а О4 опорный для П2 (рисунок 1.4а). Эти реализации позволяют получить различные отклики на выходе резервируемой цепи [46]. Также возможна реализация, когда опорные О1 и О3, также О2 и О4 соединены одним рядом переходных отверстий [47], и эти пары опорных проводников могут быть соединены между собой по краям и являться общей землей для резервируемых цепей (рисунок 1.4). Подобная реализация опорных проводников используется при проектировании СВЧ цепей на основе копланарной ЛПП, это позволяет стабилизировать характеристики на высоких частотах [48 – 50].

Таким образом, возможно использовать как лицевую, так и боковую связи между резервируемой и резервной проводниками. Все это позволяет увеличить степень свободы при проектировании ПП. Однако, данная реализация нарушает целостность опорного слоя, а также требует избыточной площади (свободной от трасс и компонентов).

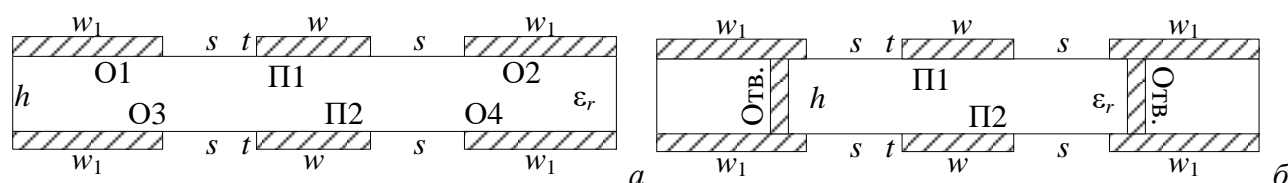


Рисунок 1.4 – Структура однослойной трассировки резервированных цепей

с лицевой связью и полигонами без (а) и с (б) соединением крайних опорных проводников где П1 и П2 – резервируемые проводники, Отв. – переходные отверстия, О1–О4 – опорные проводники

Структуры с лицевой связью и полигонами также хорошо исследованы [47]. Исследовался прототип, верхней слой которого представлен на рисунке 1.5, длина структуры 53 мм. В ней удалось добиться частичного разложения импульса помехи общей длительностью 120 пс и ослабить его примерно в 2 раза относительно одиночной копланарной ЛПП такой же длины. Однако в данном исследовании у прототипа нет возможности свободно менять нагрузки на концах пассивного проводника, так как там выставлялись нагрузки 50 Ом в виде SMD резисторов.

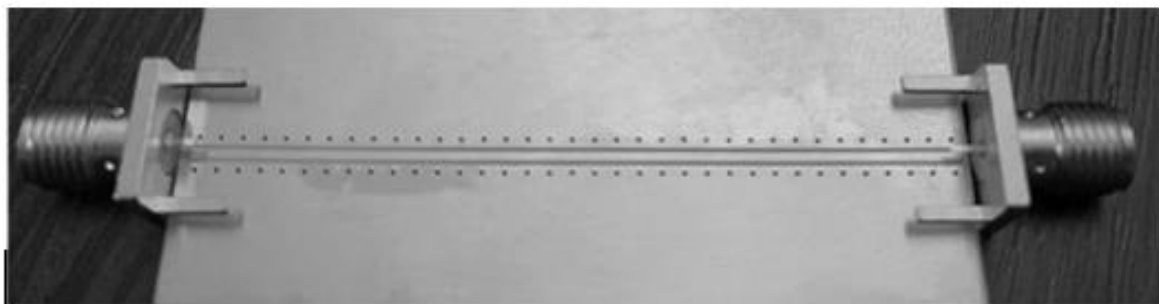


Рисунок 1.5 – Фотография верхнего слоя прототипа МФ с лицевой связью

1.2.1.3 Экранированная однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью

На рисунке 1.6 представлена экранированная однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью. Отличительной особенностью данного способа (рисунок 1.6а) является размещение элементов на противоположных склеиваемых сторонах резервируемой и резервной ПП [51–53]. Реализована сильная лицевая связь между резервируемой и резервной проводниками. Опорный проводник выполнен в форме двух полигонов. С учетом реальных параметров стека ПП значение Δt варьируется в диапазоне $0 \dots 6$ нс/м с $f_0 > 83$ МГц. Реализация указанного способа не требует сложных техпроцессов и сложной перетрассировки, поскольку резервируемые и резервные проводники выполнены на отдельных внутренних слоях многослойной ПП. Нет ограничений на элементную базу. Полигоны земли и питания выполняют роль экранов для межсоединений, находящихся на внутренних слоях. Расположение элементов друг под другом может негативно сказаться на надежности, поскольку какому-либо негативному воздействию (например, температурному или вибрационному) будут подвергаться оба (резервный и резервируемый) компонента. Реализация способа требует усложнения технического процесса установки элементов на обе стороны многослойной ПП.

На основе данного способа представлены варианты применения МР при конструировании блока цифровой обработки сигналов (ЦОС), радиоприемного устройства (РПУ) и источника питания (ИП) САН КА [54]. Также разработан прототип ПП с однократным МР, который включает в себя набор по количеству и длине ЛП [55] (рисунок 1.7). Данный прототип имеет возможность подключения к резервному проводнику произвольных нагрузок. Однако, данный прототип практически не исследовался.

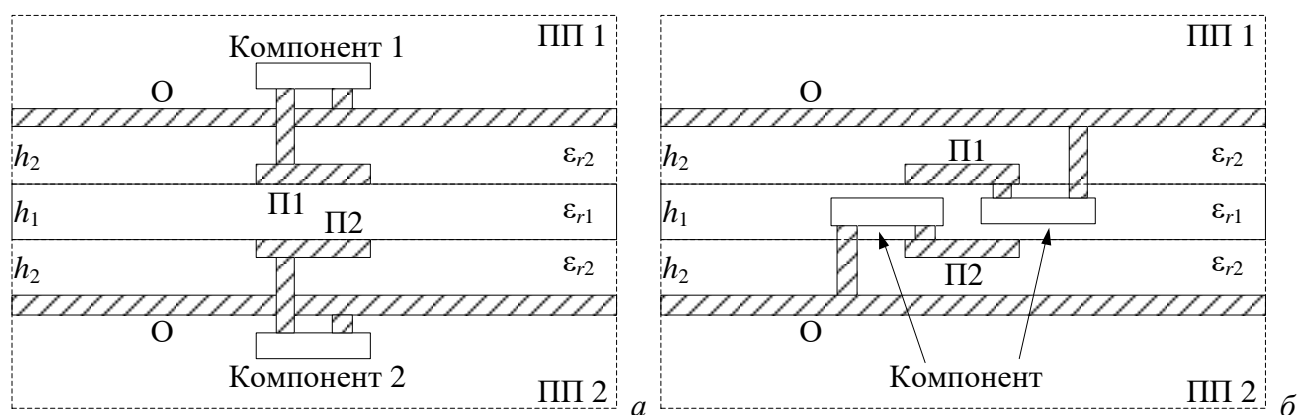


Рисунок 1.6 – Способы размещения элементов на противоположных склеиваемым сторонах (а) и внутренней компоновки элементов (б), где проводники: О – опорный;

П1, П2 – резервируемый и резервный

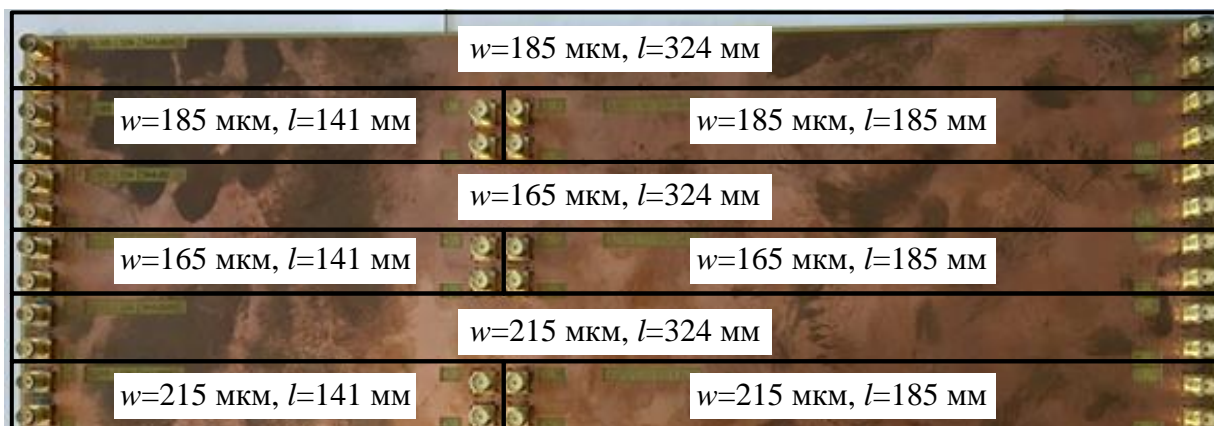


Рисунок 1.7 – Фотография прототипа ПП с МР

Также возможна реализация данного способа при внутренней компоновке элементов (рисунок 1.6б) [56]. Компоненты, в таком способе, экранированы полигонами опорных слоев. Однако, возможно использование только бескорпусной элементной базы, и габариты элементов ограничивают снизу толщину диэлектрического слоя между полосками, оказывая существенное влияние на характеристики структуры.

1.2.2 Трехкратное модальное резервирование

Здесь представлен ряд структур с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в центре, сверху и снизу, в виде боковых полигонов. Особенность этих структур заключается в симметричном расположении проводников. Поэтому, резервируемый проводник в таких структурах до отказов может быть любым, и характеристики не будут отличаться друг от друга.

1.2.2.1 Структура с исполнением опорного проводника в центре

Предложен зеркально-симметричный МФ [57], который улучшает модальную фильтрацию за счет использования зеркальной симметрии. Он (рисунок 1.8а) представляет собой 5 в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводников и диэлектрический слой, причем проводники 1 и 2 расположены на одной его стороне, два дополнительных проводника 3 и 4 расположены зеркально-симметрично относительно проводников 1 и 2 на обратной стороне диэлектрического слоя, а опорный проводник 5 расположен в диэлектрическом слое на равном расстоянии от внешних проводников [58]. Данный МФ, в общем случае, рассматривается как 4-проводная ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в данной структуре могут распространяться 4 моды основного типа Т-волны с соответствующими им характеристиками.

Однако данная реализация имеет 3 проводящих слоя и, тем самым, не удовлетворяет стандартному технологическому процессу изготовления многослойных ПП, требующему

четного числа слоев. Для решения данной проблемы разработана конфигурация зеркальносимметричного МФ, которую легче реализовать (рисунок 1.8б). Она представляет собой структуру 4-слойного исполнения, где первый и четвертый слои (внешние) – зеркально расположенная пара связанных ЛП, а второй и третий (внутренние) – соединенные переходными отверстиями слои, образующие единую схемную землю [59].

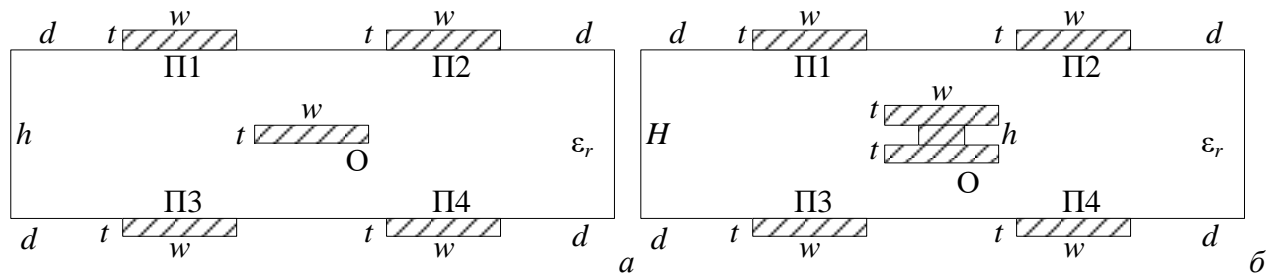


Рисунок 1.8 – Поперечные сечения структур с трехкратным МР в трехслойной (а) и четырехслойной (б) ПП с исполнением опорного проводника в центре

1.2.2.2 Структура с исполнением опорного проводника сверху и снизу

Предложен способ [60] трехкратного резервирования цепей (рисунок 1.9). Он похож на способ компоновки ПП из подпункта 1.2.1.3, но отличается тем, что дополнительно введены две резервные цепи. При этом соответствующие друг другу фрагменты трасс резервируемой и резервных цепей располагаются параллельно друг другу в склеивающем слое диэлектрика, так что резервируемая и одна резервная цепи располагаются на резервируемой ПП, а две другие резервные цепи располагаются на резервной ПП. Так же разработан прототип ПП с трехкратным МР, который включает в себя набор по количеству и длине ЛП (рисунок 1.7). Данный прототип имеет возможность подключения к резервному проводнику произвольных нагрузок. Однако, данный прототип ПП практически не исследовался.

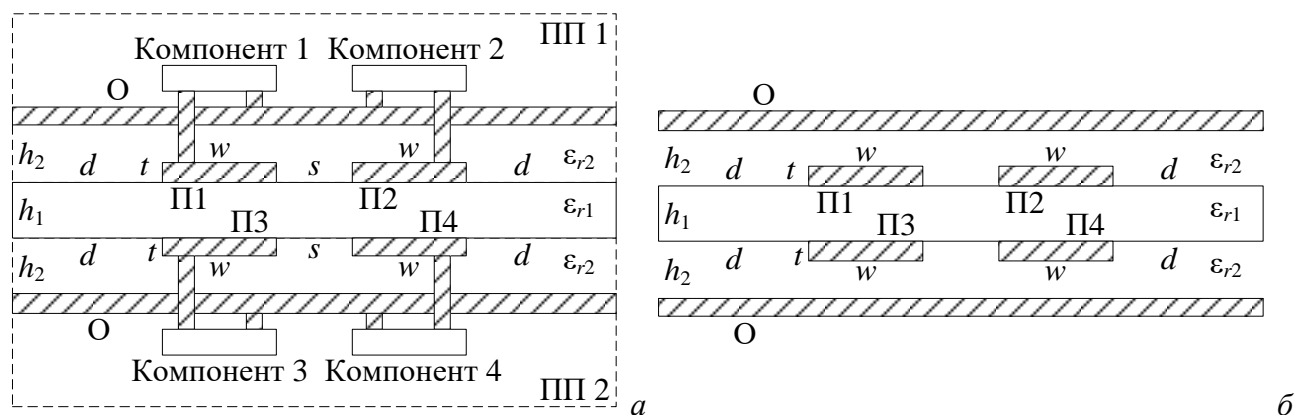


Рисунок 1.9 – Поперечное сечение структуры с трехкратным МР с исполнением опорного проводника сверху и снизу с компонентами (а) и без них (б)

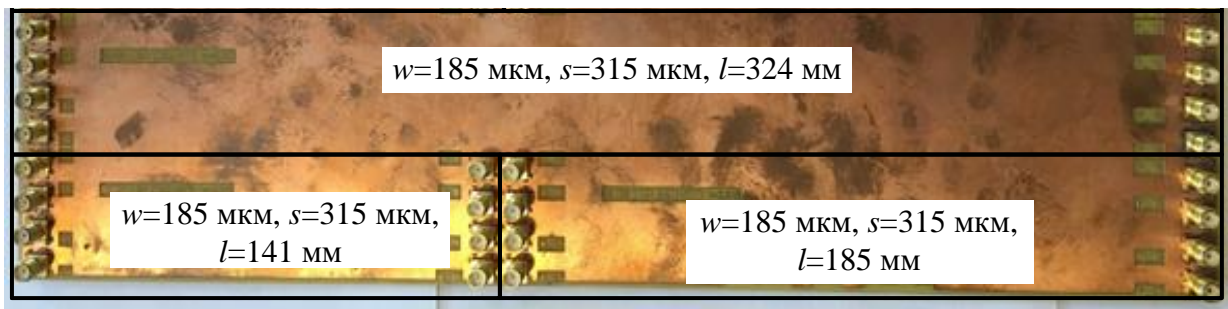


Рисунок 1.10 – Фотография прототипа ПП с МР

1.2.2.3 Структура с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов

В работе [61] предложен способ трехкратного резервирования межсоединений (рисунок 1.11). Он похож на способ компоновки ПП из пункта 1.2.1.2, но отличается тем, что дополнительно введены две резервные цепи. Здесь, также как и в 1.2.1.2, возможно выполнить различное соединение опорных проводников [62]. Однако, эта структура практически не исследовалась.

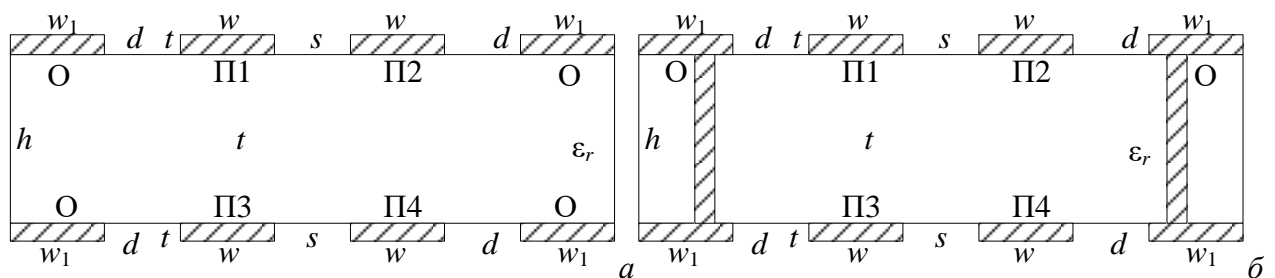


Рисунок 1.11 – Поперечные сечения структур с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в виде несоединенных (а) и соединенных (б) боковых полигонов

1.3 Подходы к исследованию временных и частотных характеристик печатных плат

Практическая реализация всех описанных способов МР требует предварительного компьютерного моделирования, вычислительных и экспериментальных исследований. На этапе предварительного моделирования необходимо получить первую оценку и границы применения структур без больших материальных и временных затрат. На этапе вычислительного эксперимента важно проверить, соответствует ли максимально приближенная к прототипу ПП вычислительная модель поставленным целям. На этапе экспериментальных исследований подтверждается или опровергается разработанная теория. При этом, все эти исследования должны быть связаны между собой для уменьшения времени между первыми предварительными и экспериментальными результатами. Здесь представлены подходы к исследованию временных и частотных характеристик ПП с модальной фильтрацией, которые применяются в данной работе. В конце приводится систематизация методов исследования.

1.3.1 Квазистатическое моделирование

Квазистатическое моделирование часто используется для предварительного компьютерного моделирования, где требуется выполнить большой объём вычислений. Оно реализовано в системе TALGAT [63–65] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Система основана на методе моментов и позволяет выполнить квазистатический анализ структур произвольной сложности. Алгоритм, реализованный в системе, позволяет вычислять матрицы погонных параметров (**L** и **C**) многопроводной ЛП. Используя модифицированный метод узловых потенциалов в частотной области и быстрое преобразование Фурье, можно рассчитать временной отклик на воздействие произвольной формы. Далее приводится общий алгоритм для анализа структур в системе TALGAT:

1. Подключение модулей UTIL, MATRIX, RESPONSE, MOM2D с использованием команд CLEAR_SCHEME, CLEAR_RESPONSE и CLEAR_STRUCTURE, RESPONSE_CLEAR для очистки временной памяти, выделенной системой.
2. Построение поперечного сечения по заданным геометрическим параметрам исследуемых структур.
3. Задание граничных условий и сегментации поперечного сечения.
4. Вычисление матриц погонных параметров.
5. Создание эквивалентных схем для моделирования структур и вычисления отклика.
 - 5.1. Задание отрезка ЛП и его параметров (матрицы **L**, **C** и длина ЛП).
 - 5.2. Задание граничных условий в виде схем из RLC-элементов с сосредоточенными параметрами.
 - 5.3. Задание воздействия в виде источника трапециевидного импульса.
 - 5.4. Задание временного шага (число отсчетов на фронт) и числа отсчетов на период повторения импульсов.
 - 5.5. Вычисление временного отклика.

Из матриц **L** и **C** для двухпроводной структуры вычисляется матрица характеристических импедансов **Z**, из собственных значений которой вычисляются волновое сопротивление мод и их среднее геометрическое сопротивление R , позволяющее выполнить псевдосогласование двухпроводной ЛП.

Далее можно определить разности задержек мод (Δt) и первую частоту резонанса (f_0) [66] для двухпроводной ЛП. Так, из матриц **C** и **L** можно рассчитать Δt в данной ЛП как:

$$\Delta t = l(\tau_e - \tau_o), \quad (1.1)$$

где τ_o и τ_e – погонные задержки четной и нечетной мод равные квадратному корню из собственных значений произведения матриц **L** и **C**. По Δt рассчитывается f_0 как:

$$f_0 = \frac{1}{2\Delta t}. \quad (1.2)$$

Данный подход позволяет выполнить предварительное компьютерное моделирование, где требуется проанализировать большой объем вычислений.

1.3.2 Электродинамическое моделирование

Для электродинамического анализа временных и частотных характеристик устройств с модальной фильтрацией часто выполняется моделирование в системе EMPro [67], при этом часто используется метод конечных разностей во временной области. Он может применяться для анализа двумерных и трехмерных структур, таких как встроенные антенны и другие устройства [68–70].

Метод конечных разностей во временной области описан в [71]. В ходе его работы решаются уравнения Максвелла без каких либо упрощений. Для удобства 6 составляющих векторов магнитного ($H_{x,y,z}$) и электрического ($E_{x,y,z}$) полей считаются расположенными в пространстве, как показано на рисунке 1.12, который представляет собой рисунок элементарной ячейки. Вся вычислительная область получается путем укладки этих кубов в большой объем. Задача разработчика для выполнения корректного моделирования состоит в том, чтобы корректно настроить сетку при моделировании устройств с МФ, например, чтобы нужное количество ячеек приходилось на проводники и на участок между проводниками.

В результате можно получить сложные и частотно-зависимые электрические параметры структуры с модальной фильтрацией. При моделировании учитываются конечная толщина проводников, а также потери в проводниках и диэлектрике [72].

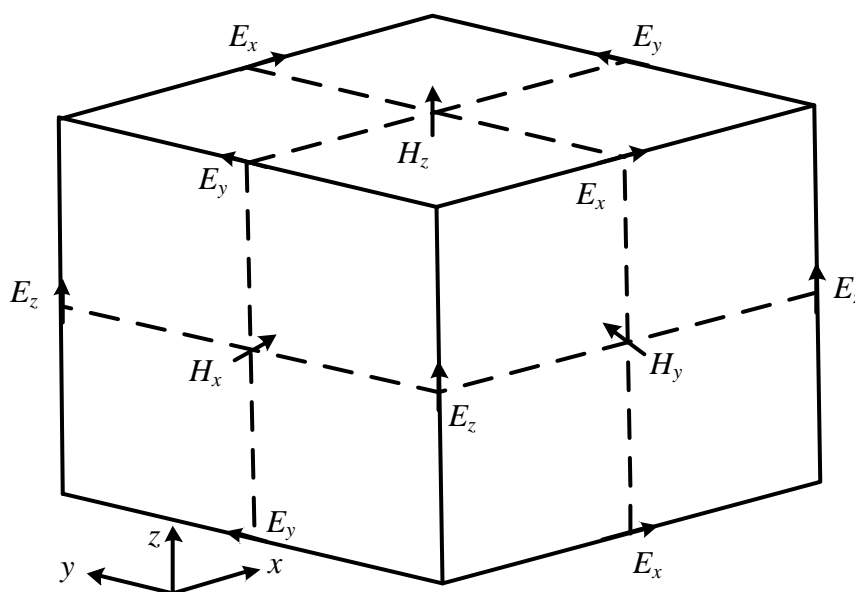


Рисунок 1.12 – Размещение элементов поля в элементарной ячейке

Метод конечных разностей во временной области, благодаря своей гибкости, удобен при работе с различными структурами ПП с модальной фильтрацией. Дополнительным преимуществом анализа во временной области является то, что в качестве возбуждения может использоваться СШП импульс, а параметры частотной области могут быть рассчитаны для всего интересующего частотного диапазона путем преобразования Фурье.

1.3.3 Экспериментальное исследование

В ряде исследований [59, 73, 74] при измерении частотных характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией применяется скалярный анализатор цепей P2M-40 (рисунок 1.13), а временных – осциллограф С9-11 (рисунок 1.13). Отметим, что данный метод экспериментального исследования прототипов ПП занимает много времени.

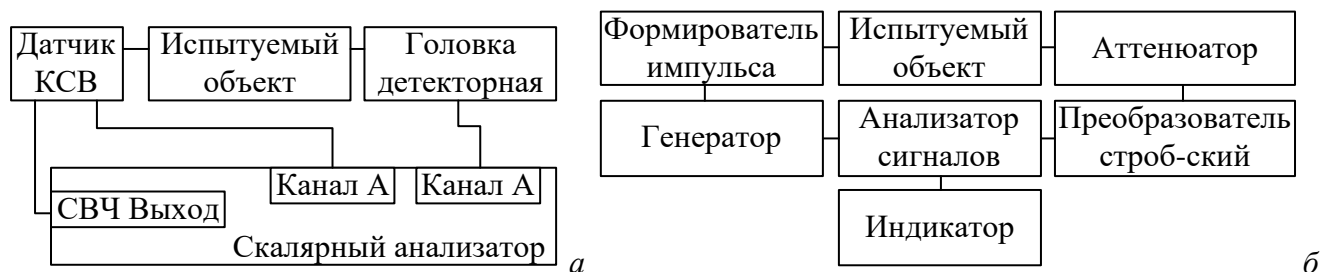


Рисунок 1.13 – Структурные схемы измерения МФ в частотной (а) и временной (б) областях

В [75] предложена комбинированная методика, позволяющая получить результаты эксперимента в частотной и временной областях N -портовых устройств, используя векторный анализатор цепей (ВАЦ) и систему ADS. На рисунке 1.14а показана структурная схема измерения S -параметров двух-портового исследуемого устройства (ИУ). Для измерения набора S -параметров N -портового ИУ должен использоваться N -портовый ВАЦ. Также получить набор S -параметров N -портового ИУ можно двухпортовым ВАЦ, для чего необходимо подсоединить к свободным портам ИУ согласованные нагрузки.

Для получения S -параметров прототипов необходимо выполнить следующее:

1. Подготовить ВАЦ и произвести калибровку в соответствии с инструкцией по эксплуатации.
2. Измерить S -параметры N -портового ИУ.
3. Сохранить полученные данные в формате S_NP .

Далее на основе S -параметров производится вычисление временного отклика в системе ADS. Существуют различные подходы к определению временных характеристик линейных и нелинейных устройств из их частотных характеристик [76 – 78]. В работе [79] авторы представили методику определения переходных процессов в межсоединениях

интегральных схем, где с помощью обратного преобразования Фурье определялась точная форма сигнала. В работе [80] авторы представили численный метод преобразования S -параметров во временную модель. При этом решались обыкновенные дифференциальные уравнения. Наиболее ясным и простым является подход, примененный в работе [81]. Так, на основе экспериментально определенных S -параметров связанной микрополосковой ЛП авторы определили временные и частотные характеристики в системе ADS.

Для вычисления временного отклика на основе измеренных S -параметров в системе ADS задается модель N -портового ИУ, определяемая S -параметрами, полученными при измерениях. После этого на вход модели подается воздействие в виде СШП импульса. Временной отклик вычисляется с помощью обратного преобразования Фурье. Эквивалентная схема для расчета временных характеристик в системе ADS, на примере двухпортового устройства представлена на рисунке 1.14б.

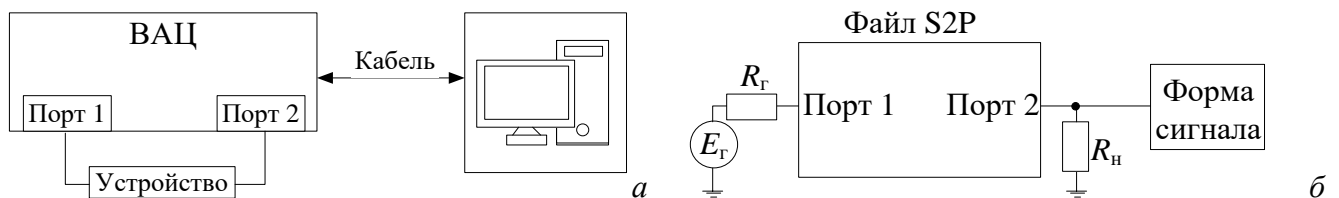


Рисунок 1.14 – Структурная схема для измерения S -параметров прототипа на ВАЦ (а) и эквивалентная схема расчета временного отклика в системе ADS (б)

1.3.4 Систематизация методов исследования

Здесь на основе выполненного обзора методов исследования приводится алгоритм проведения вычислительных и экспериментальных исследований структур с МР (рисунок 1.15). Данный алгоритм рассматривает весь цикл разработки и исследовании структур, однако в данной работе часть исследований выполнена на основе уже изготовленных прототипов. Поэтому квазистатический анализ используется только для постановки цели исследования.

При квазистатическом моделировании проводятся одновариантный и многовариантный анализы в системе TALGAT. По результатам данных анализов ставится цель исследования. В соответствии с поставленной целью проводится оптимизация структуры эвристическим поиском, также в системе TALGAT. Выбранные параметры должны соответствовать технологическим требованиям при изготовлении прототипа, если не соответствуют, то пересматриваются. Если соответствуют, то выполняется электродинамический анализ, который учитывает неоднородности разработанного прототипа. Моделирование выполняется в системе EMPro, при этом часто используется метод конечных разностей во временной области. Если результаты не соответствуют цели, то пересматривается либо цель исследования, либо

параметры поперечного сечения. Если результаты соответствуют, то изготавливается прототип ПП и проводятся экспериментальные исследования и проводится анализ полученных результатов. Экспериментальные исследования проводятся комбинированной методикой, описанной выше.



Рисунок 1.15 – Алгоритм проведения исследований

Представленный алгоритм позволяет разрабатывать и исследовать прототипы для конкретных технических и научных задач МР.

1.4 Цель и задачи работы

На основании обзора, приведенного выше, можно отметить, что для структур с МР с однослойной трассировкой необходимо дополнительно исследовать частотные и временные характеристики после отказов их элементов. У способов с однослойной трассировкой возникают проблемы с трассировкой проводников при большом количестве резервируемых цепей. Известна двуслойная трассировка, когда цепи сначала трассируются на одном слое, а потом на другом и они соединяются вместе через переходные отверстия. Таким образом, актуально разработать новые способы с МР с двуслойной трассировкой. Как следует из обзора, известны способы однократного и трехкратного МР цепей, но способы с двукратным МР не рассматривались. Также для структур с трехкратным МР необходимо дополнительно исследовать частотные и временные характеристики после отказов их элементов.

Цель работы – выявить возможности совершенствования одно-, двух- и трехкратного МР до и после отказов элементов за счет новых способов компоновки, трассировки и переключения резервируемых цепей. Для её достижения необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать характеристики структур с однократным модальным резервированием с однослойной трассировкой до и после отказов их элементов.
2. Разработать новые способы однократного МР с двуслойной трассировкой.
3. Разработать и исследовать способ двукратного МР.
4. Исследовать характеристики структур с трехкратным МР до и после отказов их элементов.

2. ОДНОКРАТНОЕ МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

2.1 Исследования характеристик структур с однократным модальным резервированием с однослойной трассировкой до и после отказов их элементов

Здесь представлены исследования временных и частотных характеристик структур с однократным МР с однослойной трассировкой до и после отказов части элементов [82–100].

2.1.1 Экранированная однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью

Здесь исследуется экранированная однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью, описанная в подпункте 1.2.1.3. Исследования выполнены на основе прототипов ПП, разработанных в [55].

2.1.1.1 Описание исследуемых прототипов

В качестве исследуемых выбраны 3 прототипа ПП с МР на основе тракта 50 Ом с длинами 141, 185, 334 мм [55] (рисунок 2.1). Стек ПП со значениями параметров приведен на рисунке 2.2. Для диэлектрика Rogers RO3010 полагалось $\epsilon_{r1}=11,2$, а для FR-4 $-\epsilon_{r2}=4,3$.

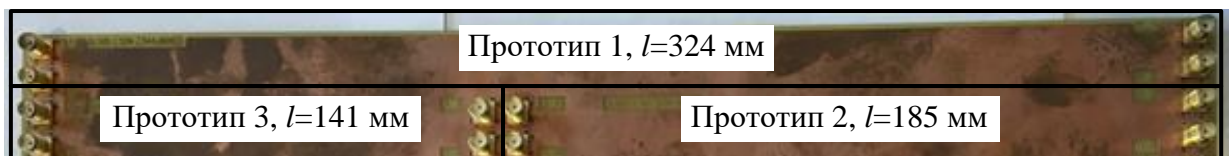


Рисунок 2.1 – Фотография прототипа ПП с МР

Материал	Толщина
Медная фольга	0,035 мм
FR-4 1080	0,6 мм (h_1)
Медная фольга	0,035 мм (t)
Rogers RO3010	0,13 мм (h)
Медная фольга	0,035 мм (t)
FR-4 1080	0,6 мм (h_1)
Медная фольга	0,035 мм (t)

Рисунок 2.2 – Стек ПП

На рисунке 2.3 представлен общий вид слоев ПП. Коаксиально-микроволновые переходы (SMA 3,5) позволяют подключиться к ближнему и дальнему концам резервного и резервируемого проводников. При отказе резервируемой цепи резервная цепь берет на себя функции резервируемой. При этом к её ближнему и дальнему концам подключается оборудование в тракте 50 Ом.

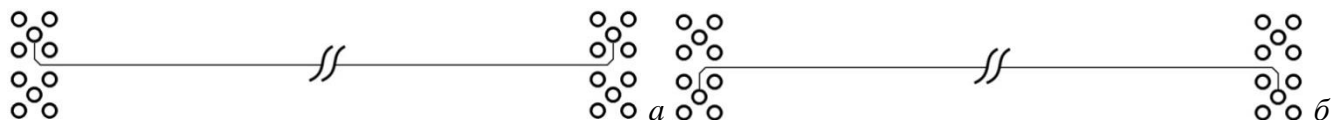


Рисунок 2.3 – Общий вид нижнего (а) и верхнего (б) слоев ПП с однократным МР

Поперечное сечение и эквивалентная схема структуры с однократным МР представлены на рисунке 2.4а. Значения параметров: ширина проводника $w=185$ мкм, расстояние от торца проводника до торца диэлектрика $d=555$ мкм. На рисунке 2.5 представлены эквивалентные схемы включения структуры с однократным МР, имитирующие отказы в виде КЗ и ХХ. Номиналы сопротивлений для пассивных проводников задавались с помощью резисторов 50 Ом, 1 МОм и 1 мкОм после различных вариантов отказа. Схема обладает полной взаимностью (амплитудная, фазовая, частотная) на проход. Из этого следует, что проходные характеристики для вариантов КЗ–50 и 50–КЗ, а также ХХ–50 и 50–ХХ, идентичны. Поэтому, далее рассматриваются только варианты 50–КЗ и 50–ХХ.

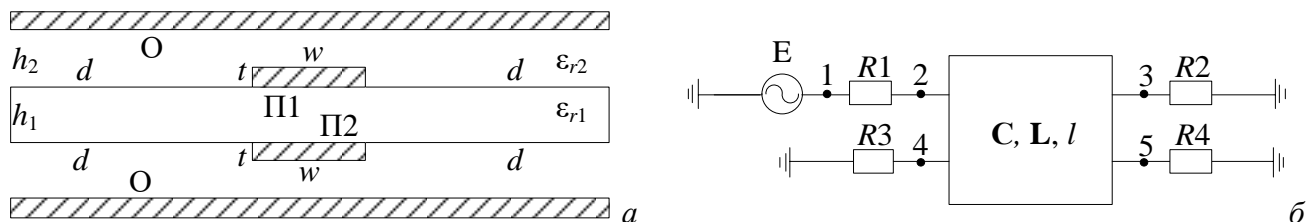


Рисунок 2.4 – Поперечное сечение (а), где проводники: П1 и П2 – сигнальные, О – опорный; эквивалентная схема (б) структуры с однократным МР

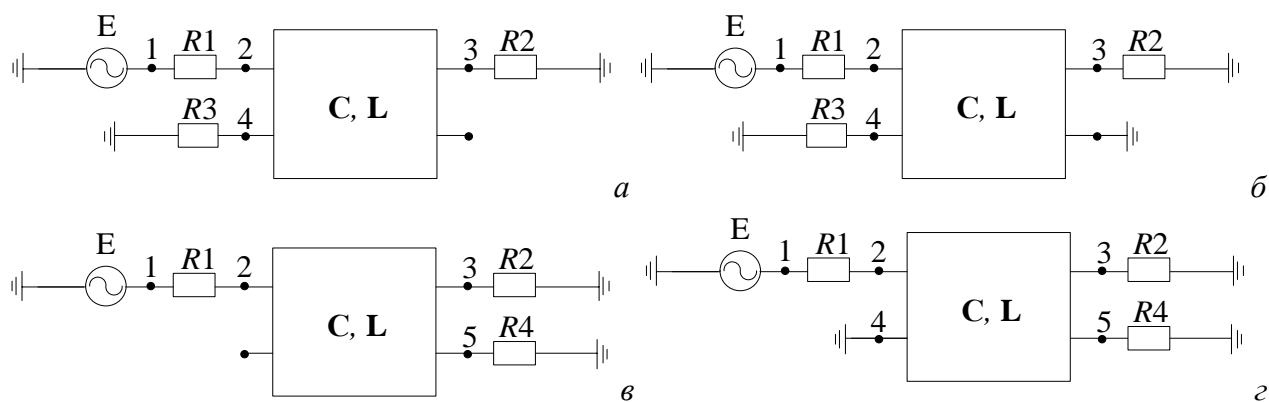


Рисунок 2.5 – Эквивалентные схемы включения, имитирующие отказы резервируемой цепи: ХХ на выходе (а), КЗ на выходе (б), ХХ на входе (в) и КЗ на входе (г)

2.1.1.2 Моделирование структур прототипов печатных плат в частотной области

Здесь выполняются квазистатический и электродинамический анализы прототипов ПП в частотной области.

Чтобы понять, как изменяются частотные характеристики в зависимости от длины структуры, в системе TALGAT выполнено квазистатическое моделирование первого минимума структуры до отказов, сначала без учета потерь в проводниках и диэлектриках (рисунок 2.6а и 2.6б). Рисунок 2.6а показывает, что значение частоты f_0 , полученное моделированием, не отличаются от расчетного. Рисунок 2.6б показывает, что значения f_0 , полученные моделированием, для ЛП с длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м отличается от расчетных на 0, 0,4 и 0,5%, соответственно. Таким образом, отводы незначительно влияют на f_0 , но формы частотных зависимостей, с добавлением отводов до SMA соединителей, значительно изменились относительно рисунка 2.6а. Так, на рисунке 2.6б появились дополнительные резонансы для отводов указанных длин с частотами резонанса 1,18, 0,904 и 0,499 ГГц, соответственно. Наличие дополнительных резонансов вызвано тем, что регулярная структура не согласована с отводом до SMA соединителей. Учет потерь в проводниках и диэлектриках (рисунок 2.6в) показал, что значения f_0 , полученные моделированием структуры с длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м, отличаются от расчетных на 2,2, 1,8 и 1,5%, соответственно.

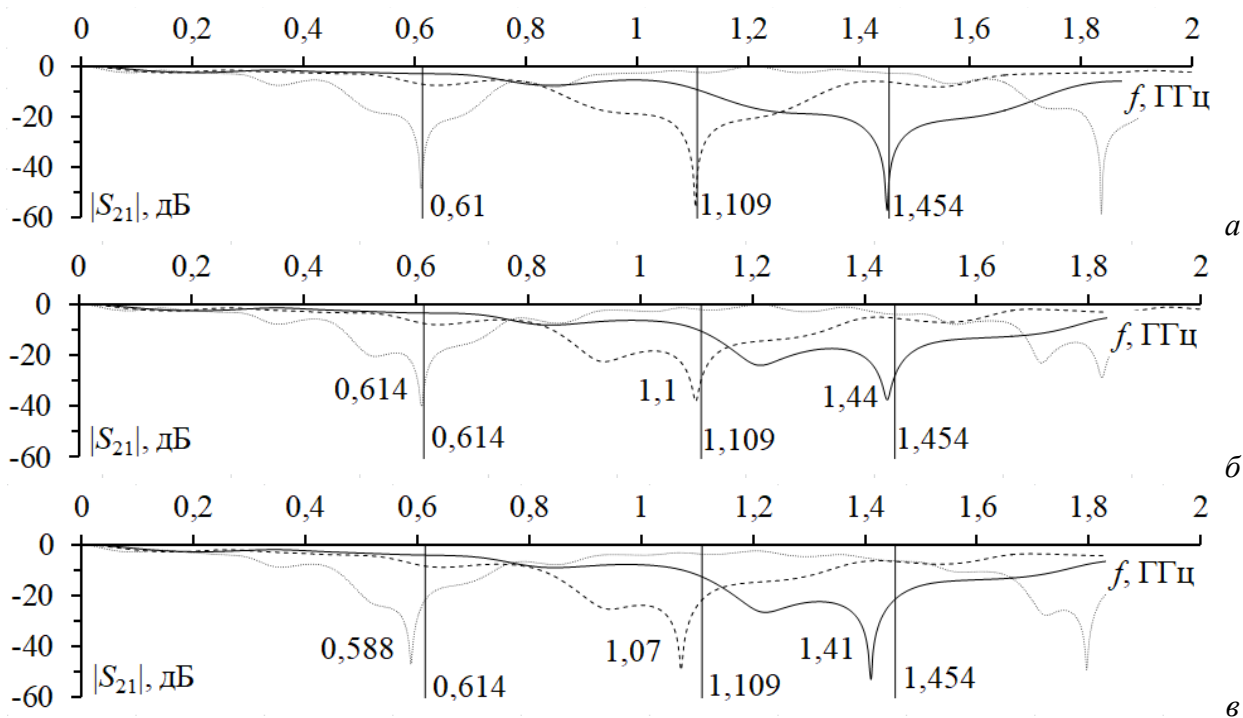


Рисунок 2.6 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ для структур с длинами 0,141 (—), 0,185 (- -) и 0,334 (···) м, вычисленные без учета потерь и отвода до SMA (а), без учета потерь и с отводом до SMA (б) и с учетом потерь и с отводом до SMA (в), расчетная f_0 (—)

Отметим, что выше рассматривался случай до отказов: когда структура согласована с нагрузками на активном и пассивном проводниках. Небольшой рассогласованный с нагрузками и регулярной структуры элемент в виде отвода до SMA соединителя изменял частотные зависимости. Учет потерь изменял значение f_0 реальной структуры от расчетного до 2%.

У реальной ПП значение каждого параметра может отличаться от номинального. Производителями материалов и ПП установлены допуски, в пределах которых параметр может изменяться. Для исследуемой ПП они могут изменяться в следующих пределах (производственные допуски [101]): ± 35 мкм для w , $\pm 0,3$ для ϵ_{r2} , от 4 до 5,5 для ϵ_{r1} , ± 13 мкм для h_2 , ± 130 мкм для h_1 .

Для оценки f_0 с разбросом параметров при производстве ПП, выполнен полный перебор минимальных и максимальных допустимых значений параметров. Найдены наборы параметров, при которых f_0 минимально ($f_{0\text{мин}}$) и максимально ($f_{0\text{макс}}$) (таблица 2.1). Оказалось, что значения f_0 для длин 0,141, 0,185 и 0,334 м могут изменяться от 1,22 до 2,17 ГГц, от 0,932 до 1,654 ГГц и от 0,516 до 0,916 ГГц, соответственно.

Таблица 2.1 – Наборы параметров для $f_{0\text{мин}}$ и $f_{0\text{макс}}$

f_0 , ГГц	w , мкм	ϵ_{r2}	ϵ_{r1}	h_2 , мкм	h_1 , мкм
$f_{0\text{мин}}$	220	11,5	4	117	695
$f_{0\text{макс}}$	150	10,9	5,5	143	435

Далее выполняются квазистатический и электродинамический анализы в частотной области, только для регулярной части прототипов (без учета отводов до SMA соединителей). Для анализа в частотной области с потерями и без потерь используются S -параметры, в частности $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$, представляющие коэффициенты передачи и отражения, соответственно. Оценивалось, как изменяется полоса пропускания полезного сигнала после отказа.

Для структуры длиной 0,334 м рассчитаны частотные зависимости $|S_{21}|$ при различных граничных условиях (рисунок 2.7) в диапазоне частот от 10 МГц до 1 ГГц. В таблицу 2.2 сведены резонансные частоты (f_0), определяющие первый минимум коэффициента передачи, а также частоты среза ($f_{\text{ср}}$), определяющие ширину полосы полезного сигнала, для всех трех случаев. Видно, что при квазистатическом (КС) моделировании для структуры с потерями в проводниках и диэлектриках $f_{\text{ср}}$ для ХХ и КЗ на конце пассивного проводника на 5,5 и 1,6%, ниже, чем для цепи в рабочем состоянии, а f_0 ниже на 8 и 11,6%, соответственно. При аналогичном электродинамическом (ЭД) моделировании $f_{\text{ср}}$ на 1,3% ниже и на 2,7% больше, а f_0 ниже на 7,3% и 10,65%, соответственно. Различия f_0 и $f_{\text{ср}}$ при квазистатическом и электродинамическом моделировании составляют не более 5,66% и 1,6%, соответственно.

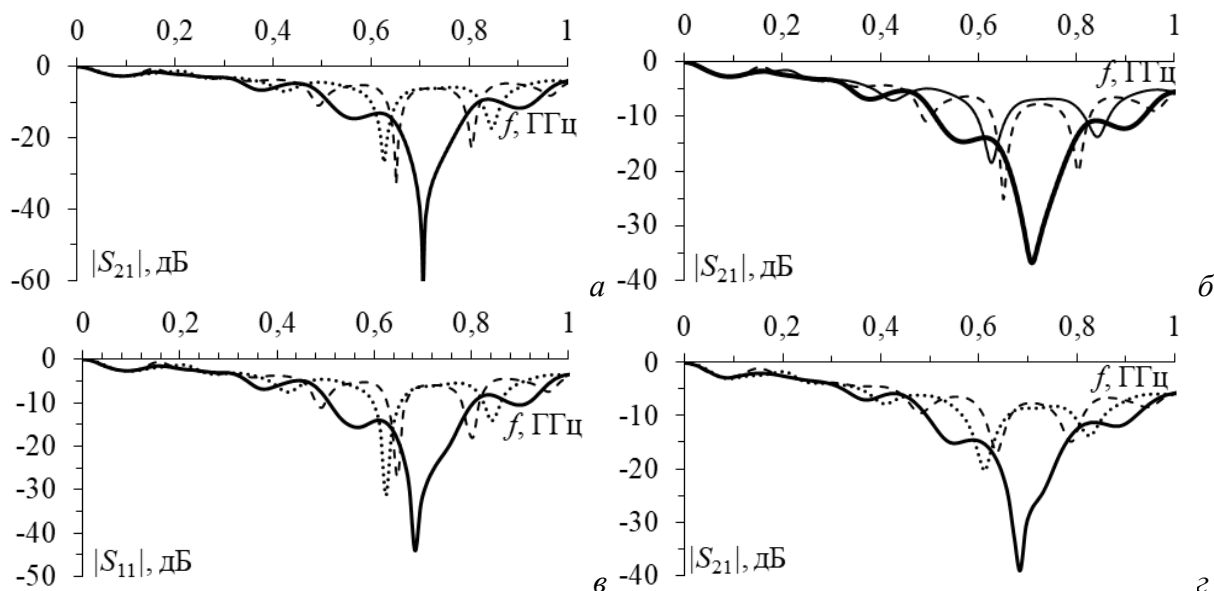


Рисунок 2.7 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ структуры с МР до и после отказа по результатам квазистатического (без (а) и с (б) учетом потерь) и электродинамического (без (в) и с (г) учетом потерь) анализов при 50–50 (—), 50–XX (---), 50–КЗ (····)

Таблица 2.2 – Частоты среза и резонанса при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника

	Потери	$f_{\text{ср}}, \text{ ГГц}$			$\Delta f_{\text{ср}}, \%$		$f_0, \text{ ГГц}$			$\Delta f_0, \%$	
		50	XX	КЗ	XX	КЗ	50	XX	КЗ	XX	КЗ
КС	Нет	0,29	0,253	0,254	-12,7	-12,4	0,706	0,651	0,626	-7,8	-11,3
	Есть	0,252	0,238	0,248	-5,5	-1,6	0,708	0,651	0,626	-8	-11,6
ЭД	Нет	0,27	0,252	0,25	-6,7	-7,4	0,685	0,648	0,625	-5,4	-8,8
	Есть	0,225	0,222	0,231	-1,3	2,7	0,685	0,635	0,612	-7,3	-10,6
$\frac{\text{КС} - \text{ЭД}}{\text{КС} + \text{ЭД}}, \%$	Нет	$\pm 3,5$	$\pm 0,2$	$\pm 0,8$	–	–	$\pm 1,5$	$\pm 0,23$	$\pm 0,08$	–	–
	Есть	$\pm 5,66$	$\pm 3,48$	$\pm 3,55$	–	–	$\pm 1,6$	$\pm 1,24$	$\pm 1,13$	–	–

Для структуры длиной 0,334 м рассчитаны частотные зависимости $|S_{11}|$ при различных граничных условиях (рисунок 2.8) в диапазоне частот от 10 МГц до 0,3 ГГц. Видно, что для вариантов 50–50, 50–XX, 50–КЗ на концах пассивного проводника в полосе пропускания (из таблицы 2.2) $|S_{11}| < -10$ дБ, а для XX–50, КЗ–50 – $|S_{11}| < -6$ дБ. Отметим, что $|S_{21}|$ для вариантов 50–XX и XX–50, 50–КЗ и КЗ–50 полностью совпадают, а $|S_{11}|$ отличаются.

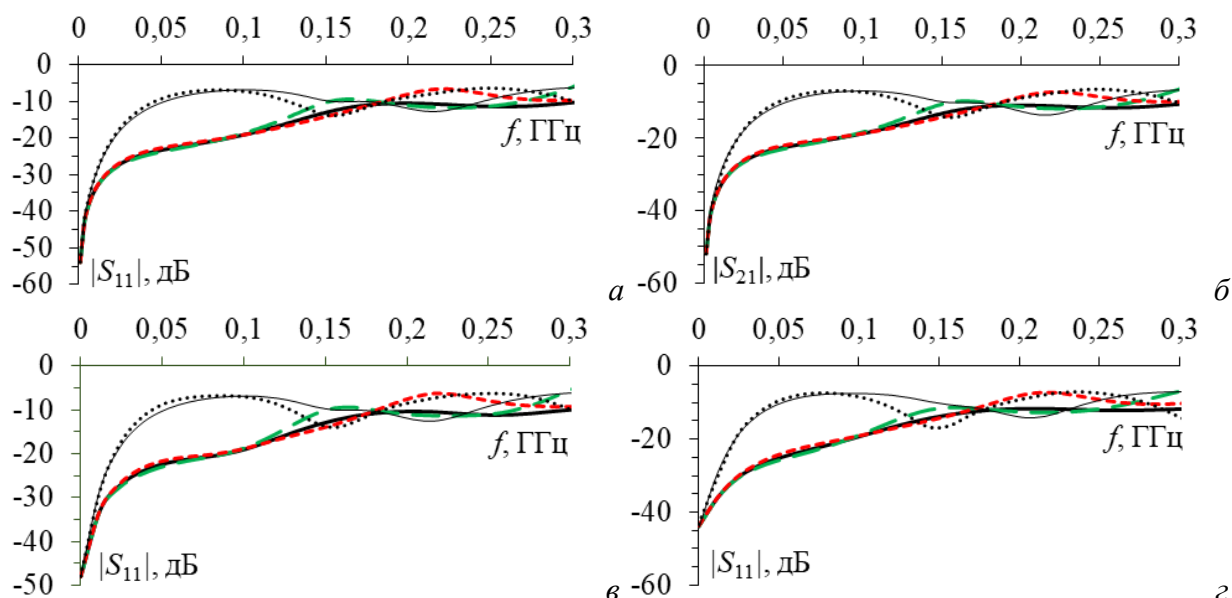


Рисунок 2.8 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ для структуры с МР до и после отказа по результатам квазистатического (без (а) и с (б) учетом потерь) и электродинамического (без (в) и с (г) учетом потерь) анализов при 50–50 (—), 50–XX (---), XX–50 (···), 50–К3 (- · -), К3–50 (····)

На рисунках 2.9 и 2.10 приведены зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ с учетом отказа для исследуемой структуры с длинами 0,185 и 0,141 м, соответственно. Выполнено квазистатическое моделирование с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. В таблицу 2.3 сведены значения f_0 и f_{cp} для всех трех случаев. Видно, что с уменьшением длины они увеличиваются.

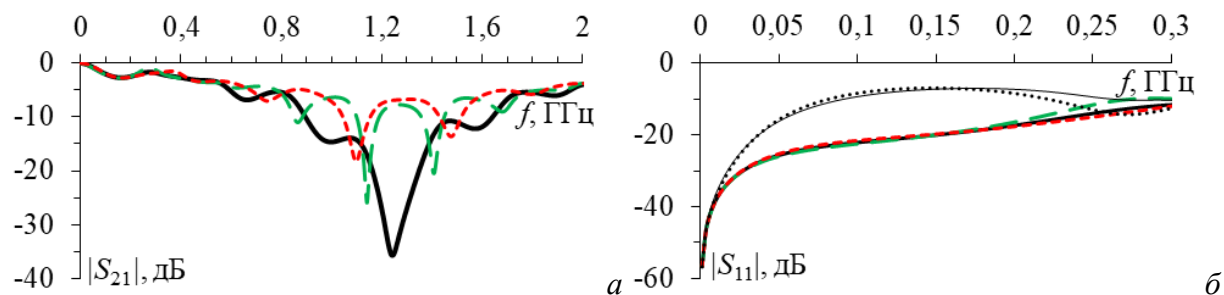


Рисунок 2.9 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ (а) и $|S_{11}|$ (б) с потерями до и после отказа структуры с МР длиной 0,185 м при 50–50 (—), 50–XX (---), XX–50 (···), 50–К3 (- · -), К3–50 (····)

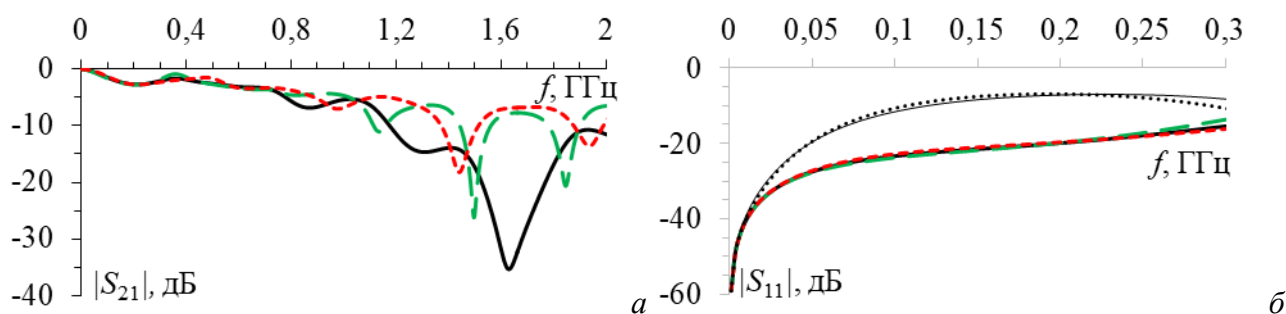


Рисунок 2.10 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ (а) и $|S_{11}|$ (б) с потерями до и после отказа структуры с МР длиной 0,141 м при 50–50 (—), 50–XX (---), XX–50 (···), 50–К3 (- · -), К3–50 (····)

Таблица 2.3 – Частоты среза и резонанса при изменении длины и граничных условий на одном из концов пассивного проводника

$l, \text{ м}$	$f_{\text{ср}}, \text{ ГГц}$			$\Delta f_{\text{ср}}, \%$		$f_0, \text{ ГГц}$			$\Delta f_0, \%$	
	50	XX	КЗ	XX	КЗ	50	XX	КЗ	XX	КЗ
0,334	0,252	0,238	0,248	-5,5	-1,6	0,708	0,651	0,626	-8	-11,6
0,185	0,438	0,415	0,436	-5,25	-0,45	1,24	1,14	1,1	-8,1	-11,3
0,141	0,572	0,542	0,57	-5,24	-0,35	1,63	1,495	1,44	-8,3	-11,66

Таким образом, представлены результаты исследования частотных характеристик структуры с МР после отказа. Сравнены результаты квазистатического и электродинамического моделирования с учетом и без учета потерь в проводниках и диэлектриках в диапазоне частот от 10 МГц до 1 ГГц. Кроме того, получены $f_{\text{ср}}$ и f_0 для структур длиной 0,141, 0,185 и 0,334 м. При квазистатическом моделировании для структуры с потерями в проводниках и диэлектриках $f_{\text{ср}}$ для XX и КЗ на одном конце пассивного проводника на 5,5 и 1,6%, ниже, чем для цепи в рабочем состоянии, а f_0 ниже на 8 и 11,6%, соответственно. При аналогичном электродинамическом моделировании $f_{\text{ср}}$ на 1,3 ниже и на 2,7% больше, а f_0 ниже на 7,3 и 10,65%, соответственно. Различия f_0 и $f_{\text{ср}}$ при квазистатическом и электродинамическом моделировании составляют не более 5,66 и 1,6%, соответственно. Для вариантов 50-50, 50-XX, 50-КЗ на концах пассивного проводника в полосе пропускания $|S_{11}| < -10$ дБ, для XX-50 и КЗ-50 $|S_{11}| < -6$ дБ. Показано, что, чем меньше длина структуры с МР, тем больше $f_{\text{ср}}$ и f_0 .

2.1.1.3 Экспериментальные исследования в частотной области

Для оценки изменений реальных характеристик в частотной области в зависимости от длины прототипа ПП, на рисунке 2.11 приведены экспериментальные зависимости $|S_{21}|$ от частоты для длин 0,141, 0,185 и 0,334 м, соответственно.

Для случаев до отказа экспериментальные значения f_0 отличаются от расчетных (при номинальных параметрах) на 7,3, 13 и 7,4%, соответственно, что больше, чем при моделировании. Это объясняется тем, что реальные параметры могут отличаться от предполагаемых, а также наличием дисперсии, которая в моделировании не учитывается. Приведены границы изменения f_0 с учетом производственных допусков. На рисунке 2.11а и в экспериментально полученные f_0 входят в границы изменения расчетных f_0 . Между тем на рисунке 2.11б экспериментальная f_0 на 4,4% меньше минимальной границы расчетных значений. Дополнительных резонансов, полученных при моделировании, не наблюдается: они могут сливаться с основным резонансом по вышеописанным причинам.

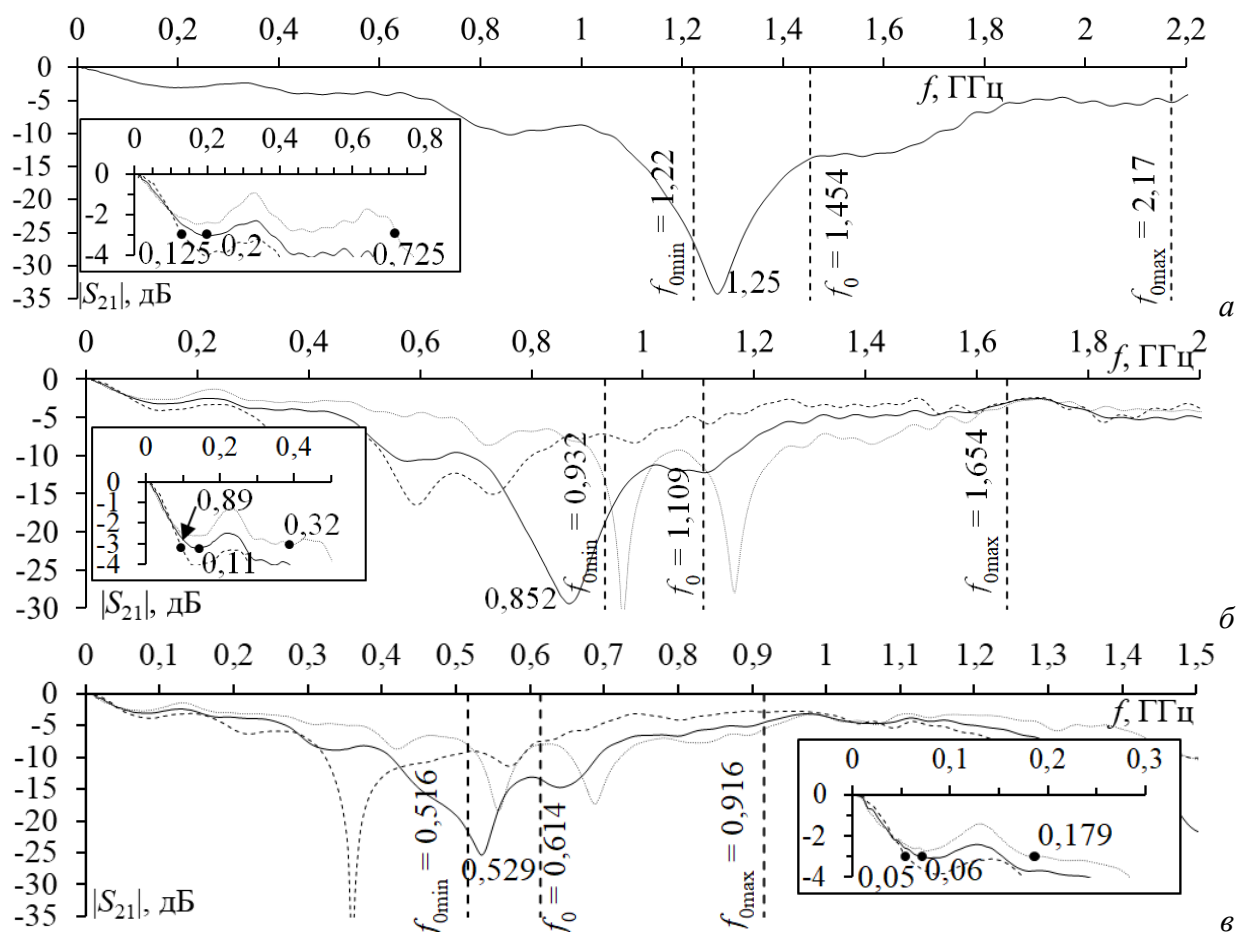


Рисунок 2.11 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ структуры с МР, при $R_4=50$ Ом (—), КЗ (---) и ХХ (--) и длинах структуры: а – 0,141; б – 0,185; в – 0,334 м; расчетные f_0 (---)

Для сравнения экспериментальных зависимостей при различных длинах структуры до и после отказов, в таблицу 2.4 сведены f_{cp} и f_0 для всех трех случаев до и после отказов. Частотные зависимости после отказов сильно искажаются из-за отражений, вызванных тем, что структура больше рассогласуется после отказов. Значение f_0 может изменяться от 2 до 20% в зависимости от длины и типа отказа, а f_{cp} после отказов также сдвигается и может уменьшаться для ЛП с длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м на 23, 10,5 и 11,5% относительно случая до отказа, соответственно. Это изменение необходимо учитывать при разработке реальной РЭА.

Таблица 2.4 – Частоты среза (f_{cp}) и резонанса (f_0) при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника для различных длин исследуемой структуры

Длина (l), м	f_{cp} , ГГц			Δf_{cp} , %		f_0 , ГГц			Δf_0 , %	
	50	ХХ	КЗ	ХХ	КЗ	50	ХХ	КЗ	ХХ	КЗ
0,141	0,2	0,725	0,125	56,7	23	1,255	1,43	0,82	6,5	20,9
0,185	0,11	0,324	0,089	49,3	10,5	0,852	0,95	0,6	5,4	17
0,334	0,063	0,179	0,05	48	11,5	0,529	0,55	0,36	1,9	19

Далее сравнены результаты эксперимента и электродинамического моделирования структуры с однократным МР в частотной области. На рисунке 2.12 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ до и после отказов, полученные в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц.

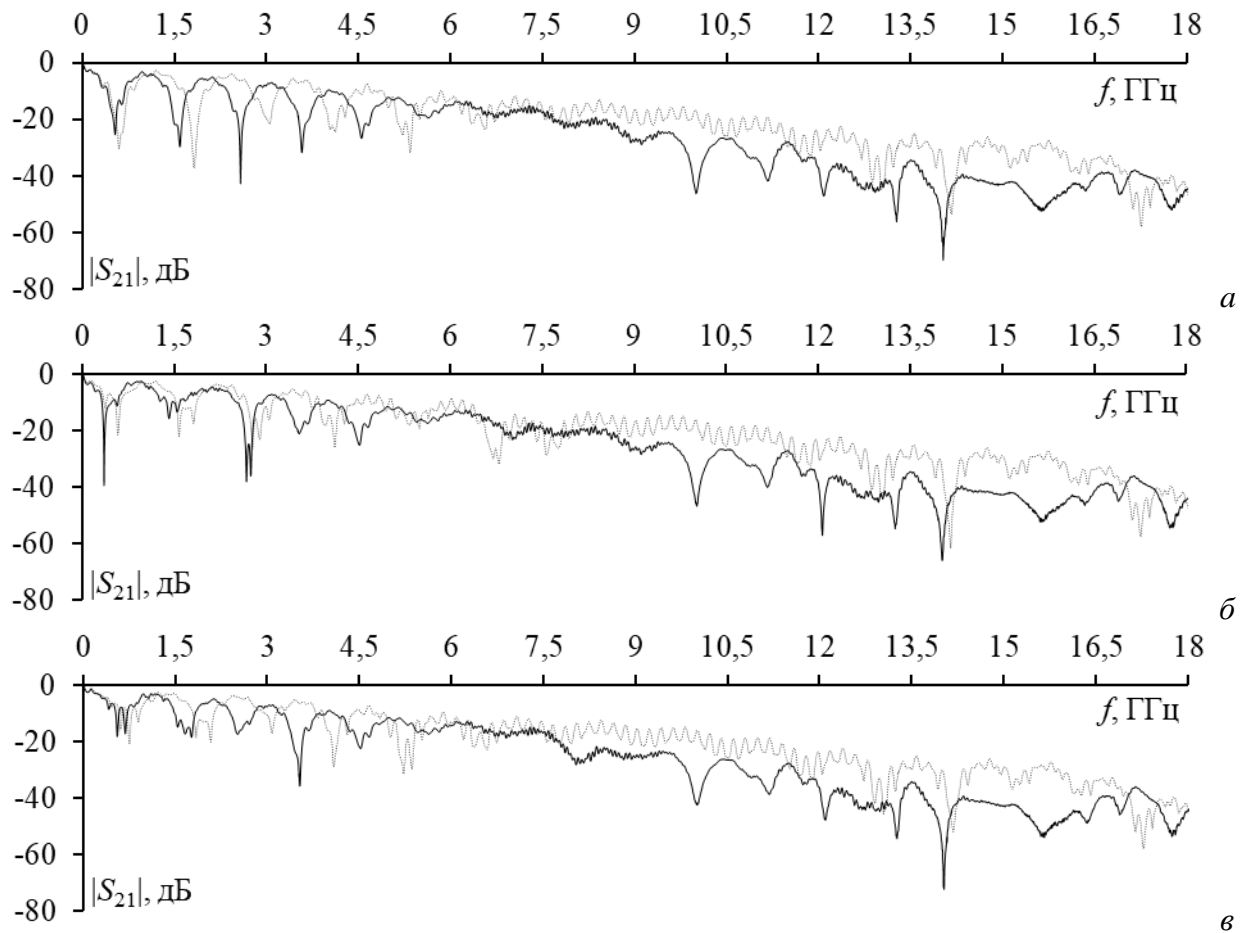


Рисунок 2.12 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 18 ГГц для структуры с однократным МР, полученные при электродинамическом моделировании (····) и эксперименте (—) при граничных условиях на ближнем и дальнем концах пассивного проводника 50-50 (а), 50-К3 (б) и 50-XX (в)

Исследуемая структура с МР близка к фильтру нижних частот. Форма огибающей передаточной характеристики структуры обусловлена габаритами и электрическими параметрами структуры. При этом, на высоких частотах формы частотных зависимостей, полученных в ходе эксперимента и электродинамического моделирования, отличаются. Это обусловлено тем, что реальные частотные зависимости материалов FR-4 и RO3010 отличаются от принятых в электродинамическом моделировании. Данные зависимости использовались для построения временных откликов в системе ADS 2020 (для согласованного случая и случаев после отказа).

На рисунке 2.13 представлены эти же частотные зависимости $|S_{21}|$, но в диапазоне частот от 10 МГц до 1 ГГц. В таблицу 2.5 сведены значения f_0 , которые определяют первый минимум коэффициента передачи, а также значения $f_{ср}$, которые определяют ширину полосы полезного сигнала. Приведены также различия между результатами до и после отказов, рассчитанные как

$$\Delta f = \frac{f_{50} - f_{отказ}}{f_{50} + f_{отказ}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где f_{50} – значение f_0 или f_{cp} до отказа, $f_{отказ}$ – значение f_0 или f_{cp} после отказа на одном из концов резервируемого проводника (XX или КЗ).

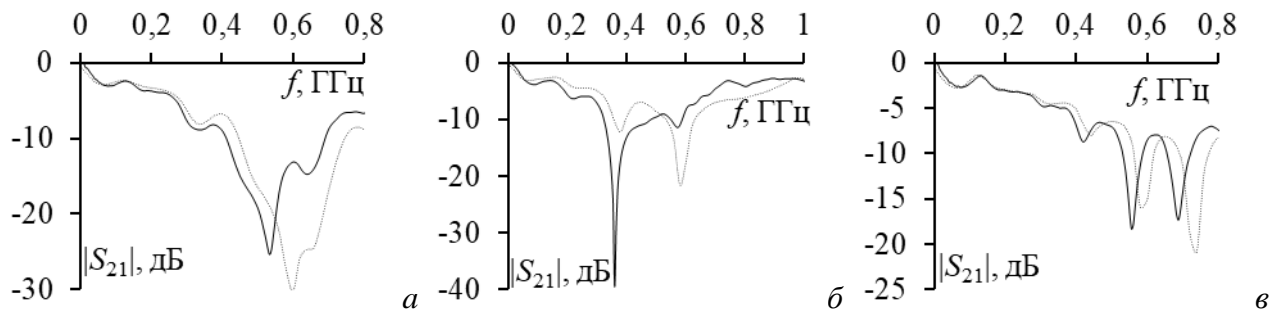


Рисунок 2.13 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 1 ГГц для структуры с однократным МР, полученные при электродинамическом моделировании (····) и эксперименте (–) при граничных условиях на ближнем и дальнем концах пассивного проводника 50-50 (а), 50-КЗ (б) и 50-XX (в)

Видно, что при электродинамическом моделировании для XX и КЗ на одном конце пассивного проводника f_{cp} отличаются от цепи в рабочем состоянии на 5,2 и 50%, а f_0 – на 0,8 и 22%, соответственно. При эксперименте для XX и КЗ на одном конце пассивного проводника f_{cp} отличаются от цепи в рабочем состоянии на 9,8 и 45%, а f_0 – на 1,8 и 19%, соответственно. Различия f_0 и f_{cp} при квазистатическом и электродинамическом моделировании составляют 50 и 22%, соответственно. Результаты показывают, что f_0 и f_{cp} до и после отказов отличаются как при эксперименте, так и при электродинамическом моделировании.

В таблицу 2.6 сведены различия результатов для f_0 и f_{cp} между экспериментом и электродинамическим моделированием для структуры до и после отказов, которые определяются отношением разности частот при вычислении (f_B) и измерении (f_H) к их сумме. Максимальное различие результатов достигает $\pm 5,9\%$ и $\pm 6,2\%$ для f_{cp} и f_0 , соответственно.

Таблица 2.5 – Частоты среза и резонанса при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника

Результаты	f_{cp} , МГц			Δf_{cp} , %		f_0 , МГц			Δf_0 , %	
	50	XX	КЗ	XX	КЗ	50	XX	КЗ	XX	КЗ
Эксперимент	0,16	0,195	0,06	9,8	45	0,53	0,55	0,36	1,8	19
Электродинамика	0,18	0,2	0,06	5,2	50	0,6	0,59	0,38	0,8	22

Таблица 2.6 – Различие результатов эксперимента и электродинамического моделирования

Формула	f_{cp} , МГц			f_0 , МГц		
	50	XX	КЗ	50	XX	КЗ
$[(f_B - f_H)/(f_B + f_H)] \cdot 100\%$	5,9	1,2	0	6,2	3,5	2,7

Из зависимостей $|S_{21}|$ от частоты при эксперименте и электродинамическом моделировании видно, что структура до и после отказов близка к фильтру нижних частот. При электродинамическом моделировании для XX и КЗ на одном конце пассивного проводника f_{cp} отличаются от цепи в рабочем состоянии на 5,2 и 50%, а f_0 – на 0,8 и 22%, соответственно. При

эксперименте для ХХ и КЗ на одном конце пассивного проводника f_{cp} отличаются от цепи в рабочем состоянии на 9,8 и 45%, а f_0 – на 1,8 и 19%, соответственно. Максимальные различия f_{cp} и f_0 между экспериментом и электродинамическим моделированием составляют 5,9 и 6,2%, соответственно.

2.1.1.4 Моделирование структур прототипа печатной платы во временной области

Здесь выполняется одновариантный квазистатический анализ во временной области регулярной части прототипа длиной 334 мм (без учета отводов до SMA соединителей). Постепенно квазистатическая модель будет усложняться и сравниваться с экспериментальным исследованием.

Эквивалентная схема для моделирования приведена на рисунке 2.4б. СШП импульс с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 200 пс подавался на вход эквивалентной схемы для структуры длиной 0,334 м. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. На рисунке 2.14 представлены формы напряжений на ближнем и дальнем концах активного и пассивного проводников. На дальнем конце активного проводника наблюдаются два импульса разложения по 0,428 В с задержками 2,3 и 3,21 нс. На ближнем конце пассивного проводника наблюдается наводка с напряжением 0,4 В, а на дальнем – два импульса разной полярности 0,428 и минус 0,428 В, соответственно.

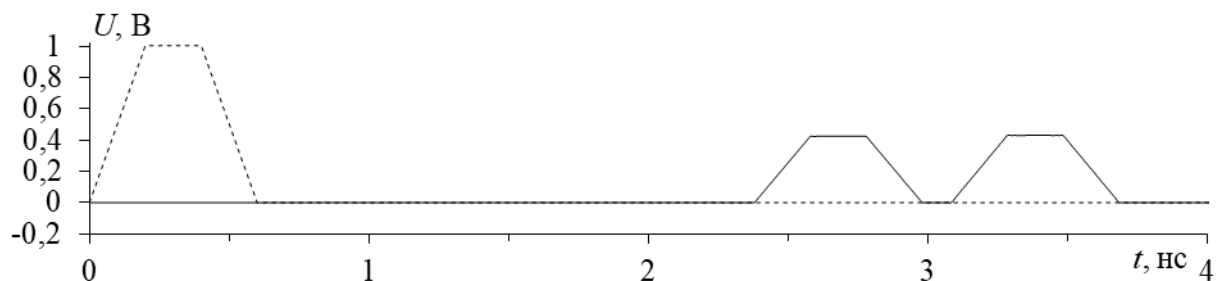


Рисунок 2.14 – Формы напряжения на ближнем (---) и дальнем (—) концах активного проводника

На рисунке 2.15 приведены формы напряжения на ближнем (узел 2 на рисунке 2.4б) и дальнем (узел 4 на рисунке 2.4б) концах активного проводника в структуре с МР при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника, которые могут возникнуть при отказе компонента. В рабочем состоянии, при резисторах на концах пассивного проводника 50 Ом, амплитуда напряжения на ближнем конце активного равна 1 В. При ХХ или КЗ на дальнем конце пассивного проводника, максимальная амплитуда напряжения на ближнем конце активного проводника равна также 1 В, но при ХХ или КЗ на ближнем конце пассивного проводника амплитуды напряжения на ближнем конце активного проводника равны 1,14 и 0,86 В, соответственно. При этом формы напряжения на дальнем конце активного проводника для отказа одного типа совпадают.

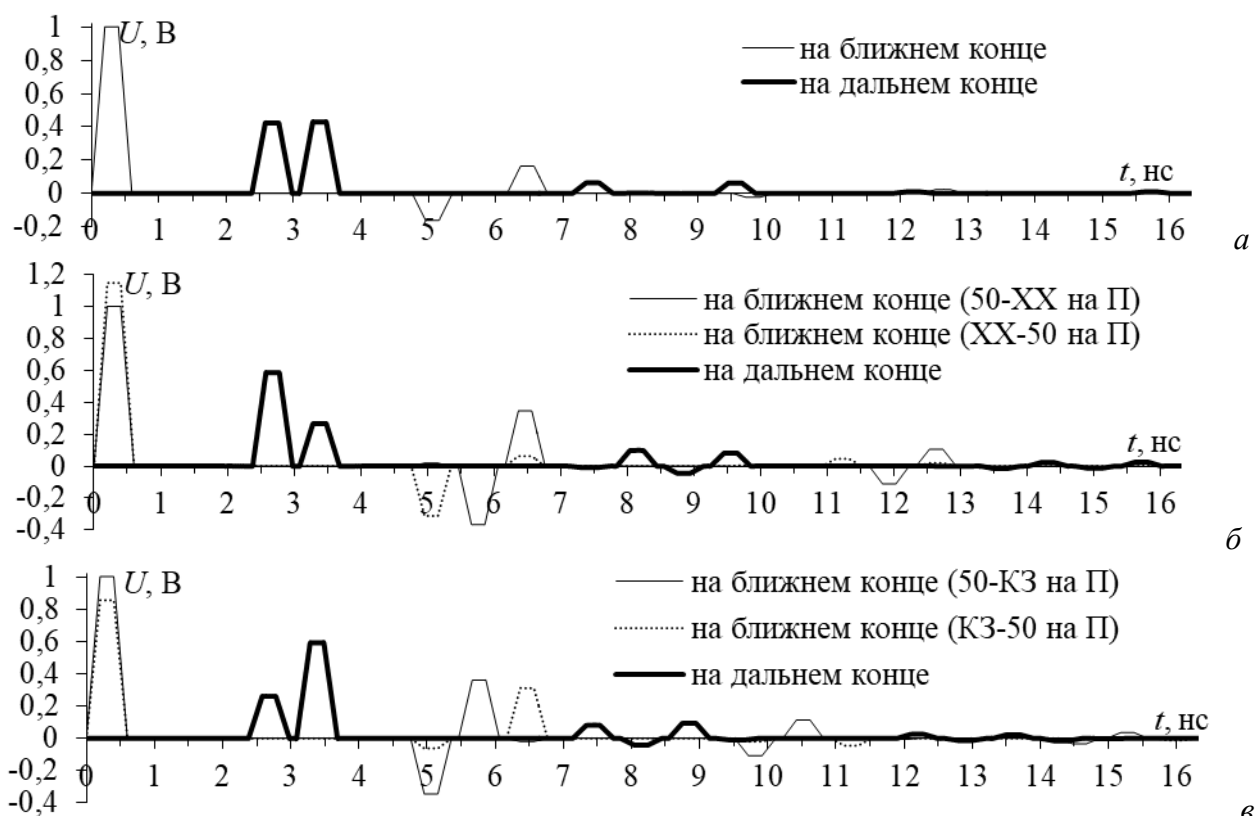


Рисунок 2.15 – Формы напряжения на ближнем и дальнем концах активного проводника в структуре с МР при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника (П): 50 Ом (а), XX (б), КЗ (в)

На рисунке 2.16 для ясности приведены отдельно формы напряжения двух первых импульсов на дальнем конце активного проводника в структуре с МР. Амплитуды импульсов меняются по-разному в зависимости от типа отказа. Задержки мод по отклику соответствуют рассчитанным из параметров.

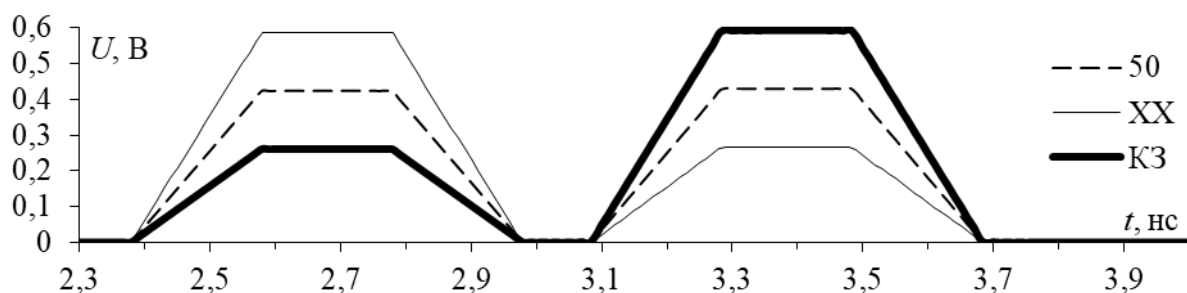


Рисунок 2.16 – Формы напряжения двух первых импульсов на дальнем конце активного проводника в структуре с МР при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника

В рабочем состоянии, при резисторах на концах пассивного проводника 50 Ом, напряжения каждого из импульсов на дальнем конце резервируемого проводника 0,42 В. При отказе компонента (КЗ или XX) на одном из концов пассивного проводника, формы напряжений на дальнем конце активного проводника изменяются (рисунок 2.16). Это обусловлено влиянием, которое оказывает изменение граничных условий пассивных

проводников на согласование активного проводника. Для ХХ на одном из концов пассивного проводника, первый импульс больше по амплитуде на 0,16 В, а второй меньше на 0,16 В, чем в рабочем состоянии ($\pm 38\%$). Максимальная амплитуда импульсов 0,58 В. Для КЗ на одном из концов пассивного проводника, наоборот, первый импульс разложения на 0,16 В меньше, а второй на 0,16 В больше, чем в рабочем состоянии. Отношение половины ЭДС к максимальному напряжению на дальнем конце резервируемой цепи при отказе компонента равно 1,7, а для цепи в рабочем состоянии – 2,3 раза.

2.1.1.5 Многовариантный анализ структуры прототипа печатной платы во временной области

Здесь выполняется многовариантный анализ исследуемой структуры. За исходные выбраны параметры прототипа. Изменялись ϵ_{r2} , w и h (рисунок 2.4а) в диапазонах от 5 до 30, от 100 до 1000 мкм и от 100 до 1000 мкм, соответственно.

Рассчитывалось отклонение (таблица 2.7) амплитуд напряжения на дальнем конце активного проводника для структуры после ($U_{\text{макс(после)}}$) отказа относительно структуры до отказа ($U_{\text{макс(до)}}$):

$$\Delta U = \left| \frac{U_{\text{макс(до)}} - U_{\text{макс(после)}}}{U_{\text{макс(до)}}} \right| \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

До отказа на обоих концах пассивного проводника полагались сопротивления равные среднему геометрическому четной и нечетной мод (в данном случае 50 Ом), а после отказа полагались либо ХХ, либо КЗ на одном из концов пассивного проводника.

Таблица 2.7 – Отклонение амплитуды напряжения для исходного набора параметров

$U_{\text{макс(до)}}$, В	$U_{\text{макс(после)}}$, В		ΔU , %	
	ХХ	КЗ	ХХ	КЗ
0,428	0,581	0,584	37,23	38,03

На рисунках 2.17 представлены зависимости ΔU от ϵ_r , w и h , а таблице 2.8 – ΔU для крайних значений ϵ_r , w и h . Из приведенных результатов следует, что с увеличением электромагнитной связи между проводниками отклонение между $U_{\text{макс}}$ до и после отказов растет и может достигать примерно 51%.

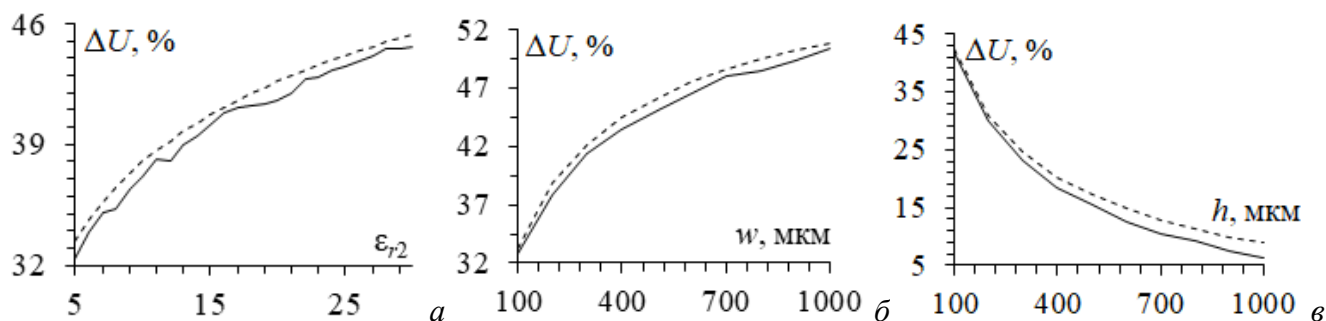


Рисунок 2.17 – Зависимости ΔU от ϵ_r (а), w (б) и h (в) при КЗ (---) и ХХ (—)

Таблица 2.8 – Изменения характеристик для крайних значений ε_r , w и h

Параметр	$U_{\text{макс(до)}}$, В	$U_{\text{макс(после)}}$, В		ΔU , %		$l\Delta\tau$, нс	R , Ом	
		XX	КЗ	XX	КЗ			
ε_r	5	0,448	0,592	0,598	32,138	33,341	0,099	59,018
	30	0,399	0,578	0,581	44,502	45,275	2,237	37,697
w , мкм	100	0,452	0,594	0,596	31,168	31,752	0,603	60,539
	1000	0,372	0,559	0,561	50,389	50,847	0,953	19,439
h , мкм	100	0,412	0,585	0,587	41,817	42,361	0,754	46,922
	1000	0,536	0,536	0,549	6,271	8,853	0,317	66,889

2.1.1.6 Экспериментальные исследования во временной области

На рисунке 2.18 представлено предварительное квазистатическое моделирование (без учета потерь в проводниках и диэлектриках) распространения СШП импульсов с общими длительностями 0,06 и 0,6 нс в структуре с МР, учитывая отводы до SMA соединителей.

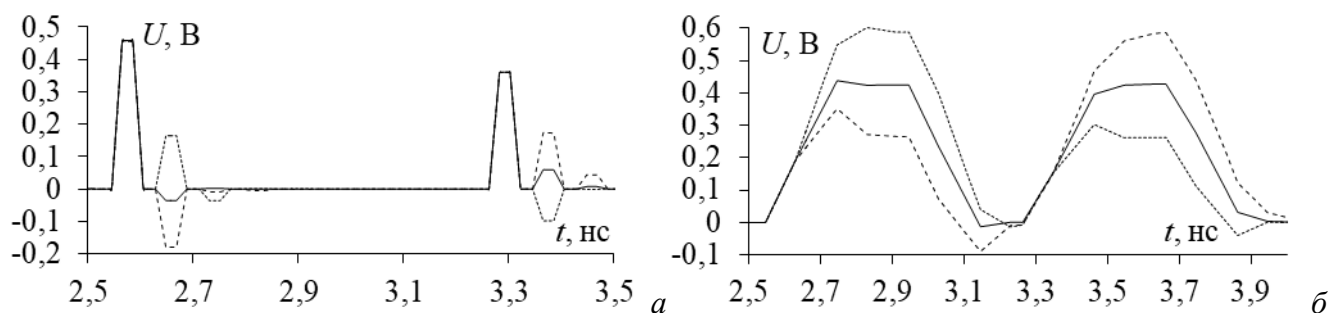


Рисунок 2.18 – Формы напряжения при воздействии СШП импульсов на дальнем конце структуры с МР длительностями 0,06 (а) и 0,6 нс (б), полученные при $R_4=50$ Ом (—), КЗ (---) и XX (····)

по результатам квазистатического моделирования без потерь

Из рисунка 2.18а видно, что СШП импульс раскладывается на 2 основных импульса меньшей амплитуды с задержками 2,54 и 3,26 нс. Также наблюдаются импульсы, отраженные от неоднородностей между отводами и SMA соединителями, первые из которых приходят с задержками 2,63 и 3,35 нс, а вторые – 2,72 и 3,45 нс. Разности между основными и первыми отраженными импульсами и между первыми и вторыми отраженными равны по 0,09 нс, что соответствует двойной задержке в отводе до SMA соединителя. Для случая без отказов ($R_4=50$ Ом), амплитуды первых отражённых импульсов равны – 0,036 и 0,059 В, что объясняется тем, что волновое сопротивление структуры с МР, отводов до SMA соединителей и граничные условия примерно равны 50, 69 и 50 Ом, соответственно. При полном согласовании отражённых импульсов не было бы. При изменении граничных условий на одном из концов пассивного проводника (различные варианты отказов) амплитуда основных импульсов не изменяется. Однако, амплитуда отраженных импульсов изменяется, и при $R_4=KЗ$ амплитуды первых отраженных импульсов уменьшаются и увеличиваются на 0,144 и 0,114 В, соответственно. А при $R_4=XX$ амплитуды первых отраженных импульсов увеличиваются и уменьшаются на 0,2 и 0,157 В, соответственно. Таким образом, максимальная амплитуда до и

после отказов при длительности импульса 0,06 нс не изменяется и равна 0,466 В. При увеличении общей длительности СШП импульса до 0,6 нс (рисунок 2.18б), основные и отраженные импульсы накладываются, и $U_{\text{макс}}$ до и после отказов изменяется.

Чтобы понять, как изменяются характеристики во временной области в зависимости от длины структуры, на рисунке 2.19 приведены экспериментальные зависимости U от времени для исследуемых структур с длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м, соответственно.

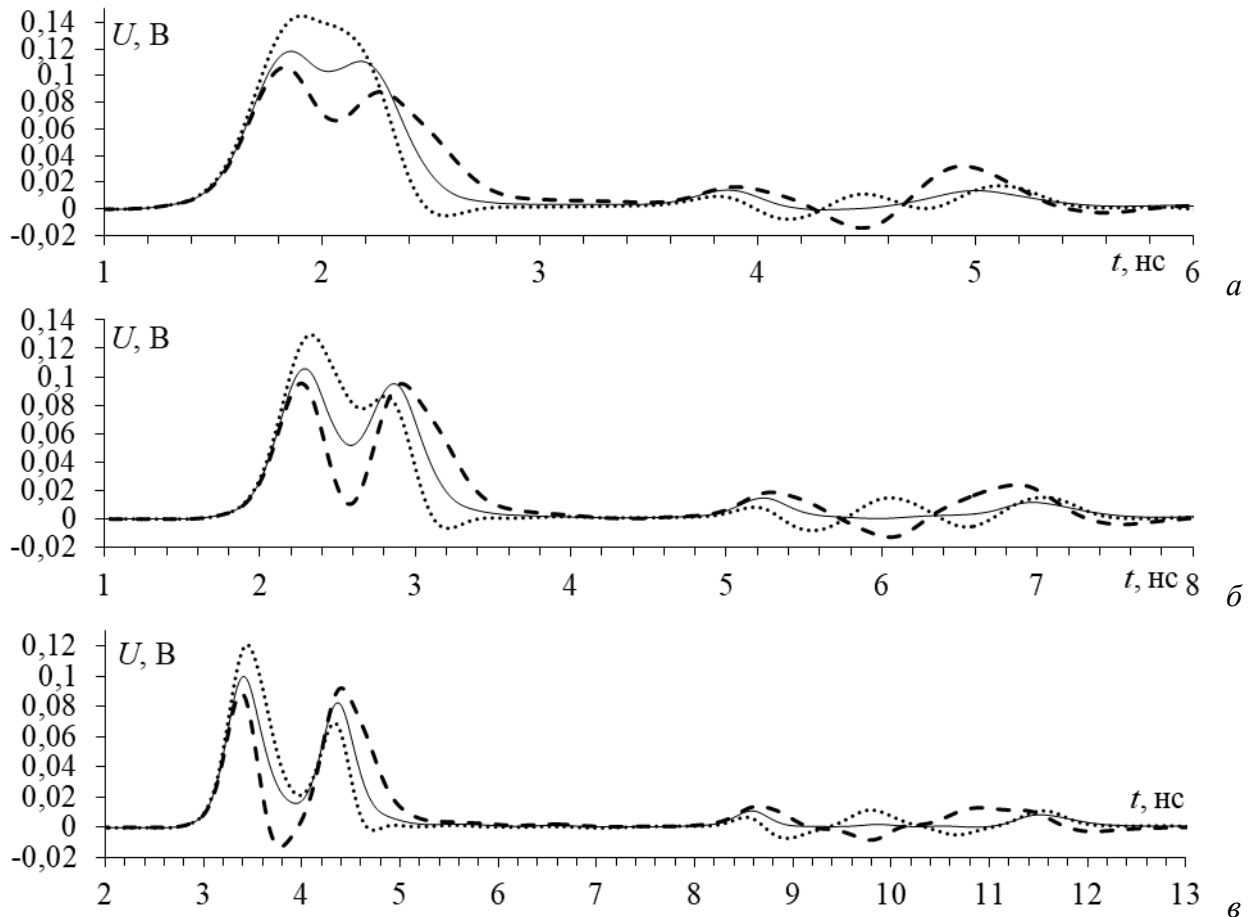


Рисунок 2.19 – Формы напряжения на дальнем конце структуры с МР, полученные из измеренных $|S_{21}|$ при $R4=50$ Ом (—), КЗ (---) и ХХ (··) и длине структуры 0,141 (а), 0,185 (б), 0,334 (в) м

Таблица 2.9 – Амплитуды (U) первых двух импульсов на выходе структуры с МР при различных длинах структуры

t , нс	Параметр	0,141 м			0,185 м			0,334 м		
		50	КЗ	ХХ	50	КЗ	ХХ	50	КЗ	ХХ
1,5	U_1 , В	0,12	0,11	0,115	0,108	0,098	0,13	0,106	0,0957	0,121
	U_2 , В	0,11	0,09	0,13	0,098	0,099	0,89	0,08	0,083	0,0712
	$U_{\text{макс}}$, В	0,12	0,11	0,115	0,108	0,099	0,13	0,106	0,0957	0,121

В работе [102] при моделировании выявлены дополнительные отраженные импульсы, которые появляются после отказа компонента на одном из концов структуры с МР и приведены их задержки. На рисунке 2.19в эти импульсы наблюдаются при эксперименте. Так, до отказов при $R4=50$ Ом наблюдаются импульсы $3\tau_1$ и $3\tau_2$ (τ_1 , τ_2 – задержки первого и второго основных

импульсов) с задержками 8,2 и 11,2 нс, соответственно, а их амплитуды равны по 0,01 В. При $R4=K3$ и XX появляются дополнительные отраженные импульсы $2\tau_1+\tau_2$ и $2\tau_2+\tau_1$, с задержками 9,5 и 10,5 нс. Импульсы с задержками $3\tau_1$, $2\tau_1+\tau_2$, $2\tau_2+\tau_1$ и $3\tau_2$ сливаются между собой и их точную амплитуду определить трудно. Некоторые из них имеют отрицательную полярность.

На рисунках 2.20 и 2.21 представлены результаты эксперимента, электродинамического и квазистатического моделирования во временной области для воздействия импульсов 0,15 и 1,5 нс, соответственно.

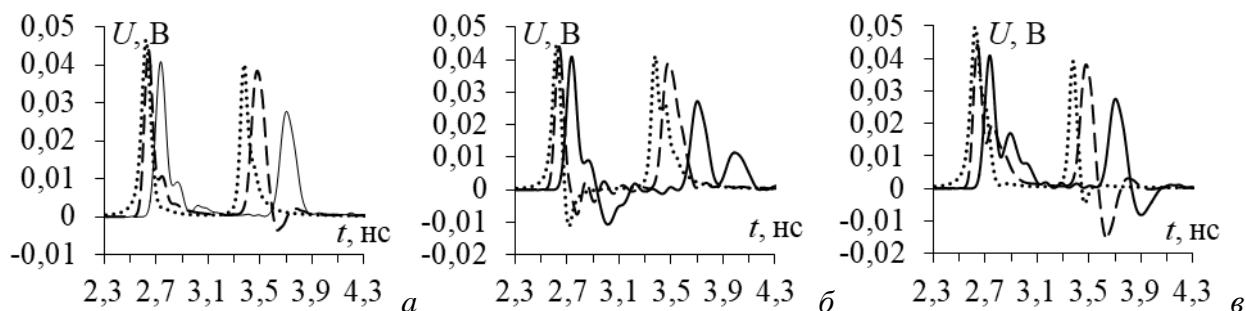


Рисунок 2.20 – Формы напряжения на дальнем конце структуры с МР, полученные при эксперименте (—), электродинамическом (---) и квазистатическом (····) моделировании при воздействии импульса 0,15 нс при $R4=50$ Ом (а), $K3$ (б) и XX (в)

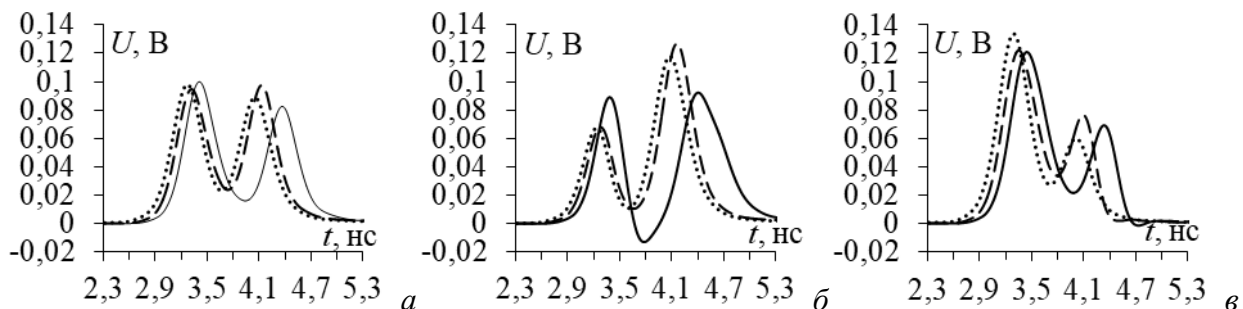


Рисунок 2.21 – Формы напряжения на дальнем конце структуры с МР, полученные при эксперименте (—), электродинамическом (---) и квазистатическом (····) моделировании при воздействии импульса 1,5 нс при $R4=50$ Ом (а), $K3$ (б) и XX (в)

Из рисунков 2.20 и 2.21 видно, что СШП импульс раскладывается на 2 основных импульса меньшей амплитуды. При этом для импульса длительностью 0,15 нс наблюдаются отраженные импульсы, а 1,5 нс – их слияние с основными. Наблюдается различие задержек мод между экспериментом и моделированием. Это обусловлено тем, что реальные ϵ_r отличаются от принятых в моделировании. Амплитуды напряжения первых двух импульсов при моделировании и эксперименте сведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Амплитуды (U) первых импульсов на выходе структуры с МР до и после отказов

t , нс	Параметр	Квазистатика			Электродинамика			Эксперимент		
		50	КЗ	ХХ	50	КЗ	ХХ	50	КЗ	ХХ
0,15	U_1 , В	0,0466	0,0445	0,0494	0,0449	0,045	0,0449	0,0432	0,0429	0,0427
	U_2 , В	0,0402	0,0411	0,039	0,0381	0,0377	0,038	0,0282	0,0276	0,0281
1,5	U_1 , В	0,0978	0,064	0,133	0,0944	0,0736	0,117	0,106	0,0957	0,121
	U_2 , В	0,0855	0,117	0,058	0,0973	0,121	0,08	0,08	0,083	0,0712

Детальный анализ эксперимента для импульса 0,15 нс показал наличие отраженных импульсов, амплитуда которых изменяется при изменении граничных условий на концах пассивного проводника, при этом $U_{\text{макс}}$ почти не изменяется. Для импульса 1,5 нс, основные импульсы сливаются с отраженными, при этом $U_{\text{макс}}$ увеличивается в 1,5 раза. Отличие $U_{\text{макс}}$ для импульсов 0,15 и 1,5 нс до отказов объясняется потерями в проводниках и диэлектриков. Однако, после отказов $U_{\text{макс}}$ для импульса 0,15 нс изменяется на 1,2%, а 1,5 нс – на 41%. В результате, наличие отраженных импульсов от неоднородностей ЛП до SMA соединителей влияет на изменение максимальной амплитуды после отказов при изменении длительности импульса.

Таким образом, приведенное исследование показало хорошую согласованность результатов моделирования и эксперимента во временной и частотной областях. При эксперименте максимальные изменения $f_{\text{ср}}$ и f_0 после отказов составляют 45 и 19%, соответственно. Из-за этого после отказов результаты могут не совпадать с ожидаемыми, что необходимо учитывать при проектировании аппаратуры с МР. Во временной области показано, что после отказов максимальная амплитуда импульсов разложения на дальнем структуры с МР изменяется, и это изменение зависит от длительности СШП импульса на входе. Данное влияние объясняется длиной отводов до SMA разъемов. Если двойная задержка в отводе больше, чем общая длительность импульса, то после отказов изменение амплитуды не будет происходить, так как отраженные импульсы не будут накладываться на основные. Однако при увеличении длины импульсы будут накладываться на основные и будут изменять максимальную амплитуду. Этот эффект необходимо учитывать при проектировании, так как он может влиять на помехозащиту и ФБ устройства.

2.1.2 Однослойная трассировка резервированных цепей с боковой связью

Здесь пункте исследуется структура с однослойной трассировкой резервированных цепей с боковой связью (рисунок 2.22). Сначала данная структура исследуется в условиях высокой плотности монтажа электрической схемы. В таком случае на резервируемый проводник, помимо резервного, влияют и дополнительные проводники на ПП. Выполнен

квазистатический анализ характеристик такой структуры. Затем разрабатывается прототип ПП для измерений в ТЕМ-камере. Рассматриваются временные и частотные характеристики прототипа ПП.

На рисунке 2.22а представлено поперечное сечение структуры с МР. Параметры поперечного сечения: ширина проводников $w=300$ мкм, расстояние между резервируемым и резервным проводниками $s=100$ мкм, толщина проводников $t=65$ мкм, толщина диэлектрика $h=510$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=4,4$, а эквивалентная схема – на рисунке 2.22б (воздействие – помеховый импульс с ЭДС 2 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 140 пс; длина ЛП – 0,5 м). Выполнялось согласование структуры с нагрузками по половине ЭДС. Нагрузки на концах эквивалентной схемы равны по $R=70$ Ом.

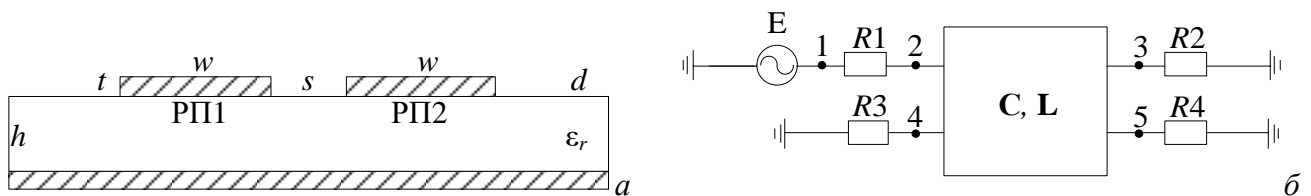


Рисунок 2.22 – Поперечное сечение, где проводники:

А – активный; О – опорный; П – пассивный (а), эквивалентная схема (б) структуры

На рисунке 2.23 приведены формы напряжения на ближнем и дальнем концах структуры. Видно, что амплитуда на ближнем конце равна 1 В, что равно половине ЭДС и подтверждает псевдосогласование структуры с нагрузками. На дальнем конце наблюдаются два импульса разложения с амплитудами по 0,5 В. Таким образом, МР позволяет ослабить импульс помехи в 2 раза на дальнем конце относительно ближнего.

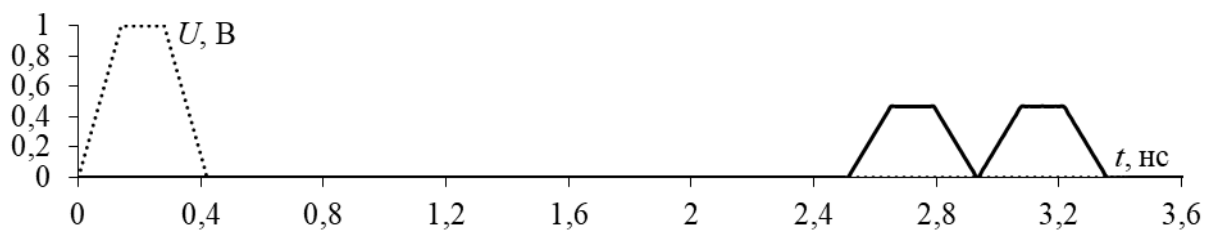


Рисунок 2.23 – Формы напряжения на ближнем (···) и дальнем (—) концах структуры

2.1.2.1 Влияние дополнительных проводников

При реализации МР уменьшаются габариты системы с резервированием, однако увеличивается плотность монтажа электрических схем, что увеличивает электромагнитные связи между различными межсоединениями и влияет на МР, когда на резервируемый проводник, помимо резервного, влияют и дополнительные проводники на ПП. Можно предположить, что это влияние может быть как вредным, так и полезным. Поэтому важно

тщательно его исследовать для выявления путей устранения вредных и использования полезных влияний для совершенствования МР.

Моделирование проводилось в системе TALGAT без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Алгоритм, реализованный в системе, описанный в пункте 1.3.1, позволяет вычислять матрицы (**L** и **C**) погонных параметров многопроводной ЛП. Из матриц **L** и **C** возможно определить ёмкостной (K_C) и индуктивный (K_L) коэффициенты связи по формулам:

$$K_C = \frac{-c_{i,j}}{\sqrt{c_{i,i}c_{j,j}}}, \quad (2.3)$$

$$K_L = \frac{l_{i,j}}{\sqrt{l_{i,i}l_{j,j}}}, \quad (2.4)$$

где $c_{i,i}$, $c_{j,j}$ – собственные коэффициенты матрицы **C** для проводников i и j в многопроводной структуре, $c_{i,j}$ – взаимные коэффициенты матрицы **C**, а $l_{i,i}$, $l_{j,j}$ – собственные коэффициенты матрицы **L** для проводников i и j в многопроводной структуре, $l_{i,j}$ – взаимные коэффициенты матрицы **L** между проводниками. Наводки на ближнем конце пропорциональны $(K_C + K_L)$, а дальнем – $(K_C - K_L)$. По этим формулам возможно оценить влияние дополнительных проводников на наводки сигнала с резервируемых на дополнительные проводники, так и с дополнительных на резервные.

На рисунке 2.24 представлены поперечные сечения структуры с однократным МР с дополнительными проводниками. Поперечные сечения структуры, имеющих 1, 2, 3 и 4 дополнительных проводника, в общем виде, построены в системе TALGAT (расстояние между резервируемым и резервным и дополнительными проводниками $s_2=300$ мкм, выбрано в соответствии с общим стандартом проектирования ПП [103]). Расстояния между проводниками ДП₁ и ДП₂, а также ДП₃ и ДП₄, выбиралось 100 мкм, так как считается, что они зарезервированы.

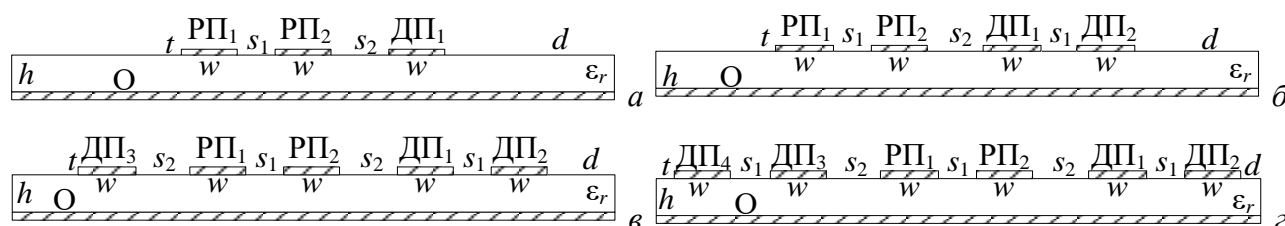


Рисунок 2.24 – Геометрические модели поперечного сечения структуры с однократным МР,

имеющей 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (з) дополнительных проводника, где проводники:

РП₁ – резервируемый; ДП₁ – дополнительный; О – опорный

В таблицу 2.11 сведены эквивалентные схемы структуры с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками. Необходимо рассмотреть формы сигналов при активных проводниках РП₁ и РП₂ отдельно для структур с 1, 2 и 3 дополнительными проводниками, так как в этих случаях

формы сигналов на дальнем конце активного проводника РП₁ или РП₂ будут различны. Это связано с несимметричным расположением дополнительных проводников относительно активного в этих структурах. Однако, при наличии 4 дополнительных проводников такой несимметричности не наблюдается. Таким образом, в этой структуре достаточно рассмотреть формы сигналов только для одного активного проводника (РП₁ или РП₂).

Таблица 2.11 – Эквивалентные схемы структуры с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками

Количество проводников	Расположение источника	
	РП ₁	РП ₂
1		
2		
3		
4		

На рисунках 2.25 и 2.26 представлены формы сигналов на дальнем конце проводников РП₁ и РП₂ структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками в сравнении с двухпроводной структурой при воздействующих импульсах с общей длительностью 30 и 420 пс, соответственно. В таблице 2.12 и 2.13 сведены задержки ($l\tau_i$) моды i и разностей задержек ($l\Delta\tau_{ji}$) мод i и j в структуре длиной l , соответственно.

Известно [40], что в структуре из i проводников, количество мод, которые распространяются в структуре, такое же (рисунок 2.25). Так, в структуре с 2 проводниками наблюдаются 2 импульса мод с задержками, представленными в таблице 2.12, а разностями задержек – в таблице 2.13. Отметим, что структура симметрична, поэтому при расположении источника на проводниках РП₁ или РП₂ отклики на дальнем конце структуры идентичны, а максимальная амплитуда $U_{\max}=0,47$ В. При добавлении 1 дополнительного проводника, в

структуре наблюдаются 3 импульса мод. При расположении источника на проводниках РП₁ или РП₂ отклики на дальних концах различны, а $U_{\text{макс}}$ равны 0,36 и 0,55 В, соответственно. При добавлении 2 и 3 дополнительных проводников, в структуре распространяются 4 и 5 импульсов мод. Как видно из рисунка 2.25б и в, импульсы мод 1 и 2 накладываются друг на друга (в обоих случаях), так как разность их задержек мала: 14 пс (таблица 2.13). При расположении источника на проводниках RC₁ или RC₂ для рисунка 2.25б $U_{\text{макс}}$ равны 0,34 и 0,36 В, соответственно, а для рисунка 2.25в – 0,35 и 0,39 В, соответственно. При добавлении 4 дополнительных проводников, в структуре распространяются 5 импульсов мод. Как видно из рисунка 2.25г, импульсы мод 1 и 2 накладываются друг на друга, так как разность их задержек равна 11 пс (таблица 2.13). При расположении источника на проводниках РП₁ или РП₂ формы сигналов идентичны, так как структура симметрична, а $U_{\text{макс}}=0,31$ В. Таким образом, в структуре с большим количеством мод возникает возможность перераспределять энергию по этим модам и уменьшить $U_{\text{макс}}$. Это видно для структуры с 1, 2 и 4 дополнительными проводниками, так как там возможно уменьшить $U_{\text{макс}}$ на 23,4, 27,6 и 34%, соответственно.

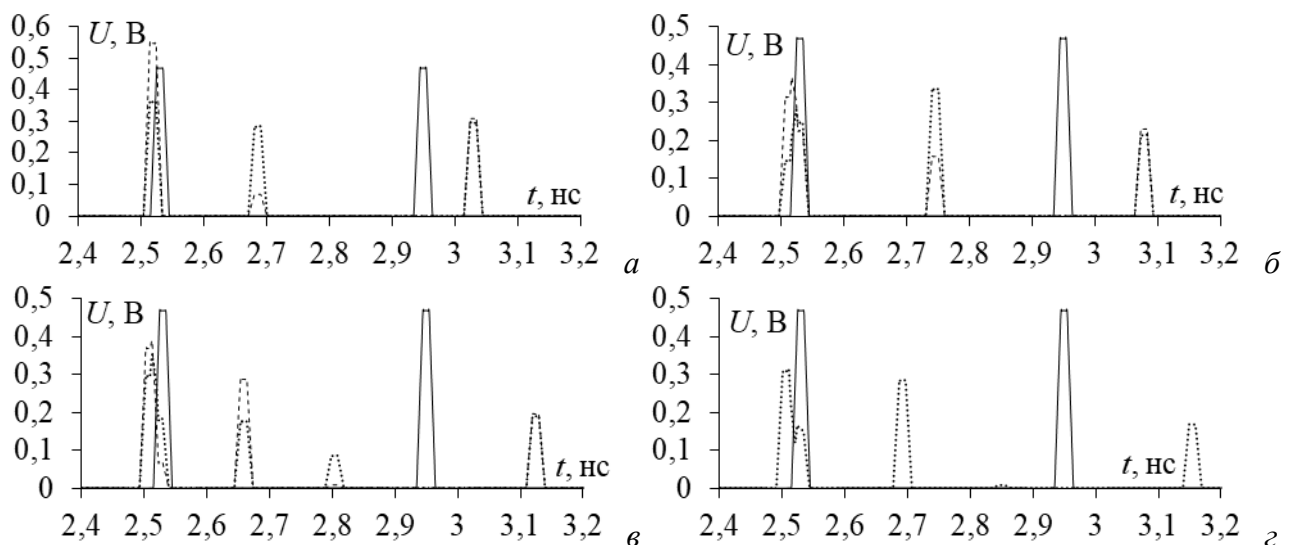


Рисунок 2.25 – Формы напряжения на дальнем конце проводников РП₁ (.....)

и РП₂ (---) структуры с дополнительными проводниками 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)

в сравнении с двухпроводной структурой (—) при воздействии импульса общей длительностью 30 пс

Таблица 2.12 – Задержки (нс) импульсов для исходной структуры (0) и структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками

$l\tau_i$	0	1	2	3	4
$l\tau_1$	2,515	2,503	2,494	2,491	2,489
$l\tau_2$	2,934	2,67	2,508	2,505	2,5
$l\tau_3$	-	3,014	2,704	2,63	2,509
$l\tau_4$	-	-	2,975	2,746	2,663
$l\tau_5$	-	-	-	3,01	2,792
$l\tau_6$	-	-	-	-	3,042

Таблица 2.13 – Разность задержек (нс) соседних импульсов для исходной структуры (0) и структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками

$l\Delta\tau_{ji}$	0	1	2	3	4
$l\Delta\tau_{21}$	0,419	0,167	0,014	0,014	0,011
$l\Delta\tau_{32}$	-	0,344	0,196	0,125	0,009
$l\Delta\tau_{43}$	-	-	0,271	0,116	0,154
$l\Delta\tau_{54}$	-	-	-	0,264	0,129
$l\Delta\tau_{65}$	-	-	-	-	0,25

С увеличением длительности импульса помехи, моды импульсов разложения накладываются друг на друга, и U_{\max} может увеличиваться. На рисунке 2.26 представлены формы сигналов на дальнем конце проводников РП₁ и РП₂ структуры с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками в сравнении с двухпроводной структурой при воздействии импульса общей длительностью 420 пс. Данная длительность импульса помехи примерно равна разности задержек мод в двухпроводной структуре, то есть это максимальная длительность, при которой $U_{\max}=0,47$ В. Добавление проводников показывает максимальные искажения отклика на дальнем конце проводника РП₁ или РП₂. Так, при добавлении 1 дополнительного проводника, на дальнем конце проводника РП₁ или РП₂ U_{\max} равны 0,58 и 0,6 В, соответственно, 2 – 0,59 и 0,6 В, 3 – 0,64 и 0,71 В, а 4 – 0,68 В. Таким образом, с ростом длительности импульса помехи, в структурах с дополнительными проводниками импульсы разложения накладываются друг на друга, и U_{\max} может увеличиваться. Так, U_{\max} для структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками больше, чем для двухпроводной на 27,6, 27,6, 51,1 и 44,7%, соответственно.

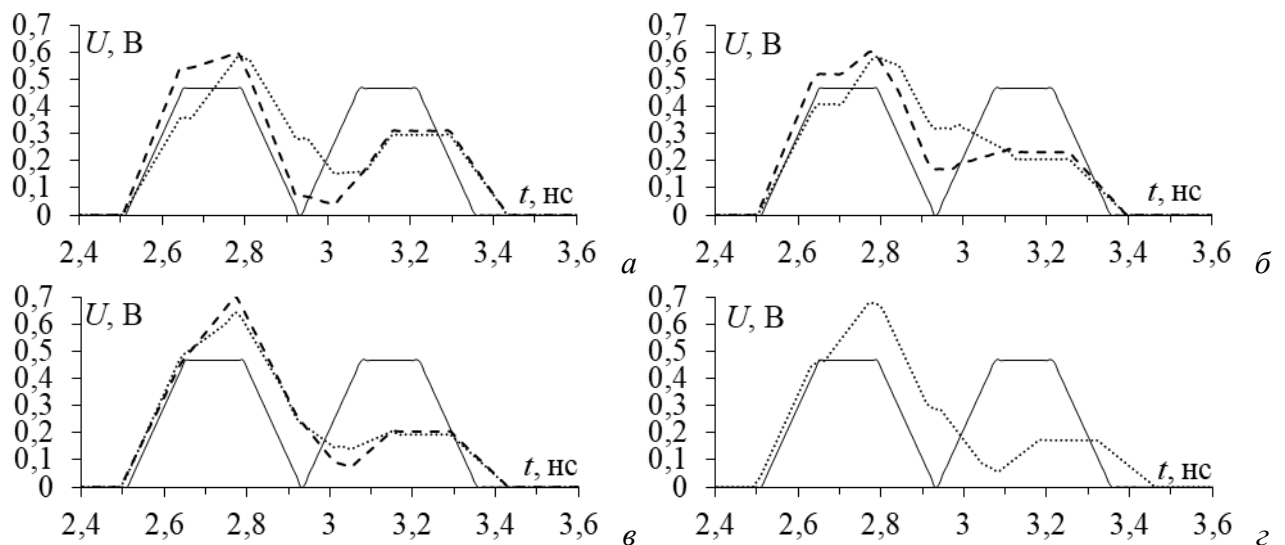


Рисунок 2.26 – Формы напряжения на дальнем конце проводников РП₁ (····) и РП₂ (- - -) структуры с 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) дополнительными проводниками в сравнении с двухпроводной (—) при воздействии импульса общей длительностью 420 пс

В таблицах 2.14 и 2.15 сведены коэффициенты связи и разности с суммами коэффициентов связи, соответственно, для исходной структуры и для структур с 1, 2, 3 и 4

дополнительными проводниками. Отметим, что $K_{C12(L12)}$ считаются из элементов матриц \mathbf{L} и \mathbf{C} , соответствующих проводникам РП₁ и РП₂, $K_{C13(L13)}$ – РП₁ и ДП₁, $K_{C14(L14)}$ – РП₁ и ДП₂, $K_{C15(L15)}$ – РП₁ и ДП₃, $K_{C16(L16)}$ – РП₁ и ДП₄, $K_{C23(L23)}$ – РП₂ и ДП₁, $K_{C24(L24)}$ – РП₂ и ДП₂, $K_{C25(L25)}$ – РП₂ и ДП₃, $K_{C26(L26)}$ – РП₂ и ДП₄. Из таблицы 2.14 видно, что с добавлением 1 дополнительного проводника K_{C12} уменьшается, но с добавлением 2 дополнительных проводников увеличивается до примерно прежнего значения. K_C между резервируемым и резервным и дополнительными проводниками уменьшается с добавлением дополнительного проводника. K_L уменьшается во всех случаях. Следовательно, вероятность электрического пробоя между соседними проводниками снижается при добавлении дополнительных проводников.

Из таблицы 2.14 видно, что $K_{C12}-K_{L12}$, с добавлением 1 дополнительного проводника, увеличивается на 9,4%, а с добавлением 2 – незначительно уменьшается на 2% относительно двухпроводной структуры. Следовательно, что наводка на дальнем конце между резервируемым и резервным проводниками будет меньше, если добавленный дополнительный проводник будет зарезервирован. $K_{C12}+K_{L12}$ (наводка на ближнем конце) с добавлением дополнительных проводников будет уменьшаться во всех случаях.

Таблица 2.14 – Коэффициенты связи для исходной структуры (0) и для структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками

$K_{Cij(Lij)}$	0	1	2	3	4
K_{C12}	0,4062	0,3922	0,4046	0,3866	0,3863
K_{C13}	-	0,0207	0,0207	0,0177	0,0175
K_{C14}	-	-	0,0091	0,0069	0,0069
K_{C15}	-	-	-	0,2046	0,1715
K_{C16}	-	-	-	-	0,0204
K_{C23}	-	0,1902	0,172	0,1716	0,1715
K_{C24}	-	-	0,0207	0,0205	0,0204
K_{C25}	-	-	-	0,0239	0,0175
K_{C26}	-	-	-	-	0,0068
K_{L12}	0,526	0,5235	0,5223	0,5193	0,5182
K_{L13}	-	0,2034	0,1997	0,1982	0,1975
K_{L14}	-	-	0,1334	0,1324	0,1319
K_{L15}	-	-	-	0,3203	0,314
K_{L16}	-	-	-	-	0,1987
K_{L23}	-	0,3216	0,3153	0,3144	0,3139
K_{L24}	-	-	0,1997	0,1990	0,1987
K_{L25}	-	-	-	0,2011	0,1975
K_{L26}	-	-	-	-	0,1319

Таблица 2.15 – Разности и суммы коэффициентов связи для исходной структуры (0) и для структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками

$K_{Cij}-K_{Lij}$	0	1	2	3	4
$K_{C12}-K_{L12}$	-0,12	-0,1313	-0,1177	-0,1327	-0,1319
$K_{C13}-K_{L13}$	-	-0,1827	-0,179	-0,1805	-0,18
$K_{C14}-K_{L14}$	-	-	-0,1243	-0,1255	-0,125
$K_{C15}-K_{L15}$	-	-	-	-0,1157	-0,1425
$K_{C16}-K_{L16}$	-	-	-	-	-0,1783
$K_{C23}-K_{L23}$	-	-0,1314	-0,1433	-0,1428	-0,1424
$K_{C24}-K_{L24}$	-	-	-0,179	-0,1785	-0,1783
$K_{C25}-K_{L25}$	-	-	-	-0,1772	-0,18
$K_{C26}-K_{L26}$	-	-	-	-	-0,1251
$K_{C12}+K_{L12}$	0,932	0,9157	0,9269	0,9059	0,9045
$K_{C13}+K_{L13}$	-	0,2241	0,2204	0,2159	0,215
$K_{C14}+K_{L14}$	-	-	0,1425	0,1393	0,138798
$K_{C15}+K_{L15}$	-	-	-	0,5249	0,4855
$K_{C16}+K_{L16}$	-	-	-	-	0,2191
$K_{C23}+K_{L23}$	-	0,5118	0,4873	0,486	0,4854
$K_{C24}+K_{L24}$	-	-	0,2204	0,2195	0,2191
$K_{C25}+K_{L25}$	-	-	-	0,225	0,215
$K_{C26}+K_{L26}$	-	-	-	-	0,1387

Таким образом, выполнен квазистатистический анализ характеристик структуры с МР с дополнительными проводниками. Показано, что в структуре с большим количеством мод возникает возможность перераспределять энергию по этим модам и уменьшать U_{\max} . Это видно для структур с 1, 2 и 4 дополнительными проводниками, так как там возможно уменьшить U_{\max} на 23,4, 27,6 и 34%, соответственно. Показано, что с увеличением длительности входного импульса помехи, импульсы разложения в структурах с дополнительными проводниками накладываются друг на друга, и U_{\max} увеличивается. Так, U_{\max} для структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками больше, чем для двухпроводной, на 27,6, 27,6, 51,1 и 44,7%, соответственно. Показано, что $K_{C12}-K_{L12}$, с добавлением 1 дополнительного проводника, увеличивается на 9,4%, а 2 – незначительно уменьшается на 2%. Поэтому, что наводка на дальнем конце между резервируемым и резервным проводниками будет меньше, если добавленный дополнительный проводник будет зарезервирован.

2.1.2.2 Разработка прототипа печатной платы

Для измерения излучений в ТЕМ-камере необходимо разработать ПП с МР с размерами 98*98 мм с отступами в 10 мм. Частотный диапазон исследований в ТЕМ-камере ограничивается 5 ГГц. Однако, здесь рассмотрен более широкий частотный диапазон от 10 МГц до 20 ГГц, который ограничивается пропускной способностью SMA переходов. В таблице 2.16 представлены марки доступных материалов, а также их толщины диэлектрика, фольги и диэлектрические проницаемости, которые фиксированы для каждой марки. Значения параметров s и w оптимизировались эвристическим поиском (этот метод выбран из-за простоты

структуры) в диапазонах от 200 до 3000 мкм. Нижняя граница этого диапазона определяются 3 классом точности при изготовлении прототипов, а верхняя – расстоянием между центрами ножек SMA соединителей (примерно 5 мм), чтобы разработанная ЛП поместилась между ними. Оптимизация проводилась по критериям максимизации Δt и согласования с трактом 50 Ом. Для каждого полученного набора параметров приведены значения f_0 при длине структуры 7 см. Это говорит о том, что данные прототипы можно корректно использовать, только для исследований на излучаемые эмиссии в полосе пропускания полезного сигнала до 5 ГГц. Для исследований на восприимчивость они не подходят, так как МФ действует только после частоты f_0 . Для дальнейших исследований выбран материал FSD1020T с соответствующими ему параметрами структуры из таблицы 2.16.

Таблица 2.16 – Параметры структуры на различных марках материалов

Марка	ε_r	h , мкм	t , мкм	w , мкм	s , мкм	Δt , нс/м	Z , Ом	f_0 , ГГц
СТФ 0.5 105	4,3	290	105	450	200	0,828	49,64	8,62
СТФ 1 105	4,3	790	105	1150	200	0,858	50,04	8,32
СТФ 1.5 105	4,3	1290	105	1790	200	0,854	49,99	8,36
СТФ 2 105	4,3	1790	105	2380	200	0,847	50,06	8,43
СТФ 0.25 35	4,3	180	35	300	150	0,668	50,43	10,68
СТФ 0.5 35	4,3	430	35	700	150	0,724	49,91	9,86
СТФ 1 35	4,3	930	35	1390	150	0,734	50	9,73
СТФ 1.5 35	4,3	1430	35	2020	150	0,730	50	9,78
СТФ 2 35	4,3	1930	35	2610	150	0,725	50	9,84
FSD1020T	10,2	254	35	200	175	1,233	49,49	6

Далее описаны прототипы ПП с МР. Их разработка выполнена в системе автоматизированного проектирования электроники EasyEda. Общий вид ПП (размеры 98×98 мм) в виде Gerber файлов приведен на рисунке 2.27. Кроме изначального варианта для одиночной ЛП (рисунок 2.27а) ($w=290$ мкм по всей длине ЛП), реализован вариант с МР, из двух ЛП с сильной боковой связью (рисунок 2.27б). Прототип включает в себя посадочные места для SMA соединителей, соединенных с концами резервируемых и резервных электрических соединений. При этом соседние SMA соединители располагались так, чтобы между их центрами было 1,5 см для подключения измерительного оборудования. Длина связанной ЛП составляет 7 см, а отвода до SMA соединителя – 0,78 см.

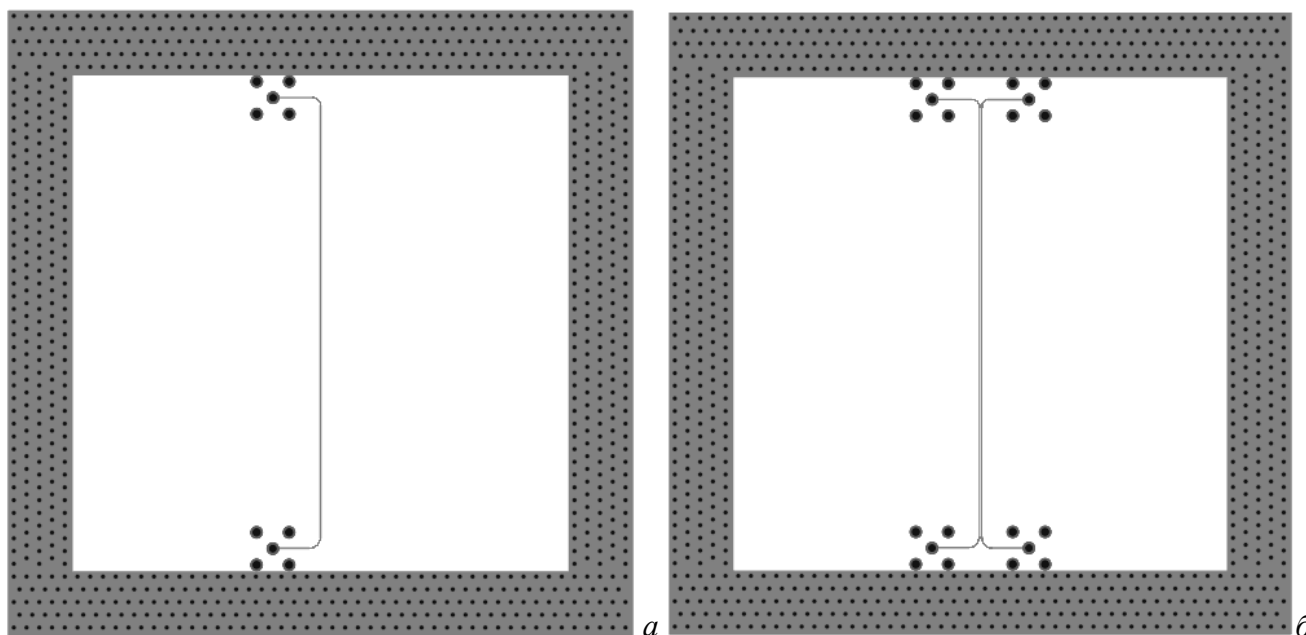


Рисунок 2.27 – Общий вид верхнего слоя структур ПП без (а) и с (б) однократным МР

2.1.2.3 Измерение геометрических параметров

При производстве ПП допустимы технологические допуски в пределах используемого класса точности, которые определяются технологией производства. Данная ПП изготавливалась позитивным методом травления в соответствии с 3 классом точности. Выше было показано (подпункт 2.1.1.2), что разброс геометрических параметров, определяемых классом точности, может существенно влиять на временные и частотные характеристики структуры.

Для сравнения результатов эксперимента и моделирования измерены ширина проводников (w) и расстояние между ними (s), которые использовались при электродинамическом моделировании. На рисунке 2.28 представлена фотография экспериментальной установки для измерения параметров. При съемке использовался тринокулярный микроскоп Huvitz HSZ-700 с цифровой камерой Lusic HC-30MU. Результаты съемки выводились на экран монитора. Калибровка микроскопа проводилась следующим образом: в качестве эталона использовалось оптоволокно шириной 125 мкм, микроскоп визуально настраивался на необходимый масштаб и получалось изображение оптоволокну, на экране монитора определялось, сколько пикселей укладывается в ширину оптоволокну (в данном случае, примерно 80; таким образом, 1 пиксель равен 1,56 мкм). При измерении w и s ПП на экране монитора измерялось число пикселей, которые укладываются в ширину проводника или расстояние между проводниками, соответственно; оно умножалось на 1,56 мкм.

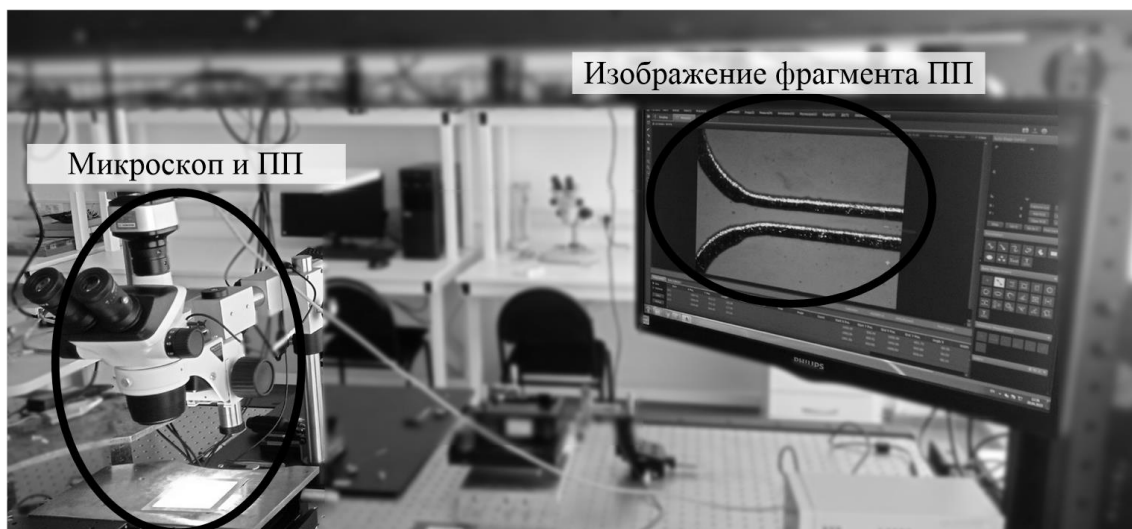


Рисунок 2.28 – Фотография экспериментальной установки для измерения параметров

На рисунке 2.29 представлены фотографии верхних слоев структур ПП без и с однократным МР, разбитых на фрагменты, которые измерялись на микроскопе.

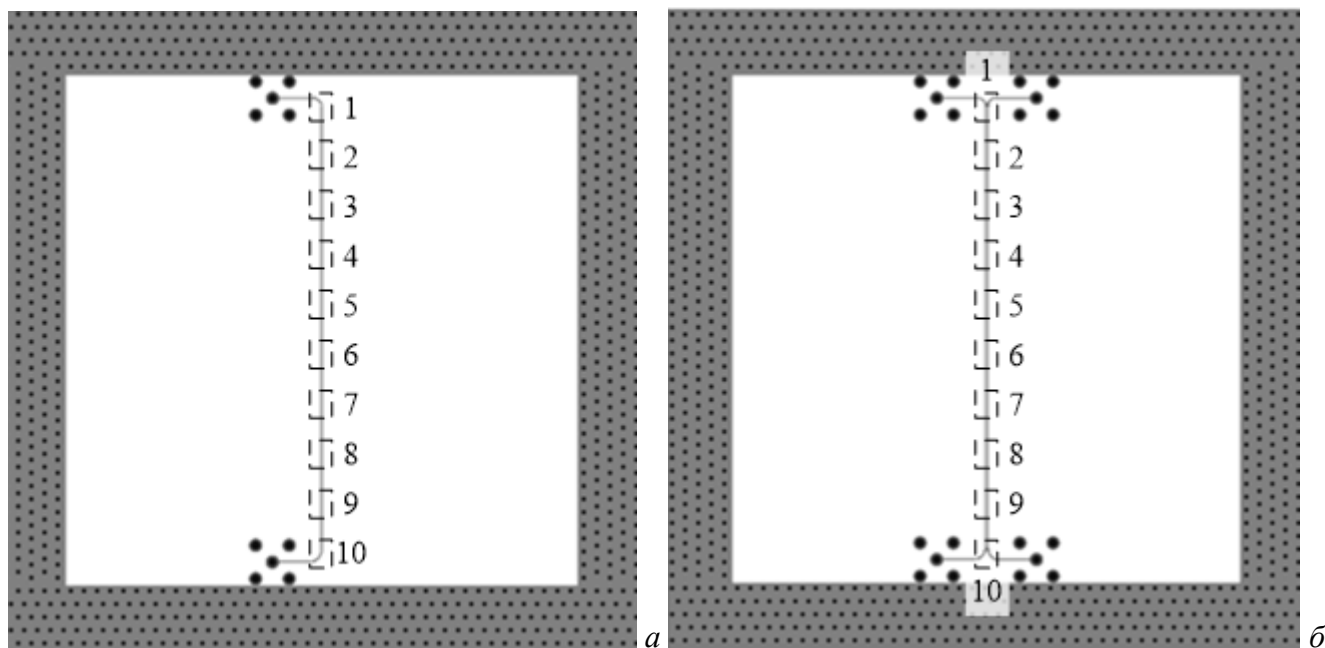


Рисунок 2.29 – Фотографии верхнего слоя структур ПП без (а) и с (б) однократным МР, разбитых на фрагменты, измеренные на микроскопе

На рисунке 2.30 приведены фрагменты 1 и 6 прототипа ПП без МР (для примера). На рисунке 2.31 представлена зависимость w от номера измеренного фрагмента. Видно, что w по длине ЛП изменяется от 301 (фрагмент 4) до 324 (фрагмент 9) мкм. При этом номинальное значение по фотошаблону $w=290$ мкм. Таким образом, измеренное значение превышает номинальное не больше, чем на 34 мкм. Для электродинамического моделирования $w=311$ мкм – среднее значение из всех измеренных.

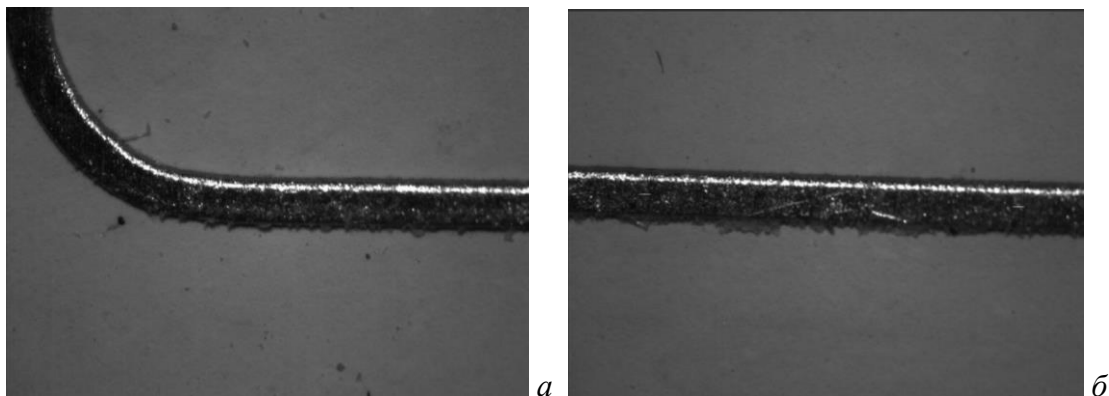
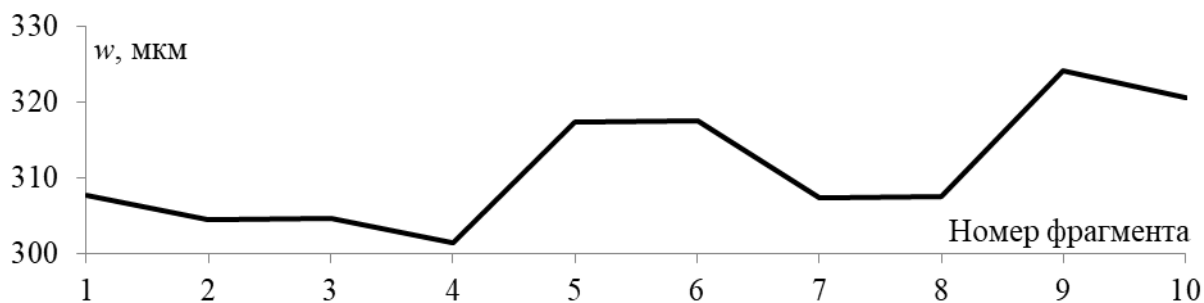


Рисунок 2.30 – Фрагменты 1 и 6 прототипа ПП без МР

Рисунок 2.31 – Зависимость w от номера фрагмента

На рисунке 2.32 приведены фрагменты 1 и 6 прототипа ПП с МР (для примера). На рисунке 2.33 представлены зависимости w_1 , w_2 и s от номера измеренного фрагмента. Видно, что w_1 по длине ЛП изменяется от 195 (фрагмент 2) до 211 (фрагмент 8) мкм, а w_2 – от 204 (фрагмент 1) до 227 (фрагмент 7) мкм. При этом номинально $w=w_1=w_2=200$ мкм. Таким образом, измеренные значения w_1 и w_2 превышают номинальное не больше, чем на 11 и 27 мкм, соответственно. Для электродинамического моделирования взяты $w_1=200$ мкм, $w_2=215$ мкм – средние значения из измеренных.

Значение s по длине ЛП изменяется от 176 (фрагменты 7 и 8) до 195 (фрагменты 1 и 9) мкм. При этом номинально $s=175$ мкм. Таким образом, измеренное значение превышает номинальное не больше, чем на 20 мкм. Для электродинамического моделирования взято $s=186$ мкм – среднее значение из измеренных.

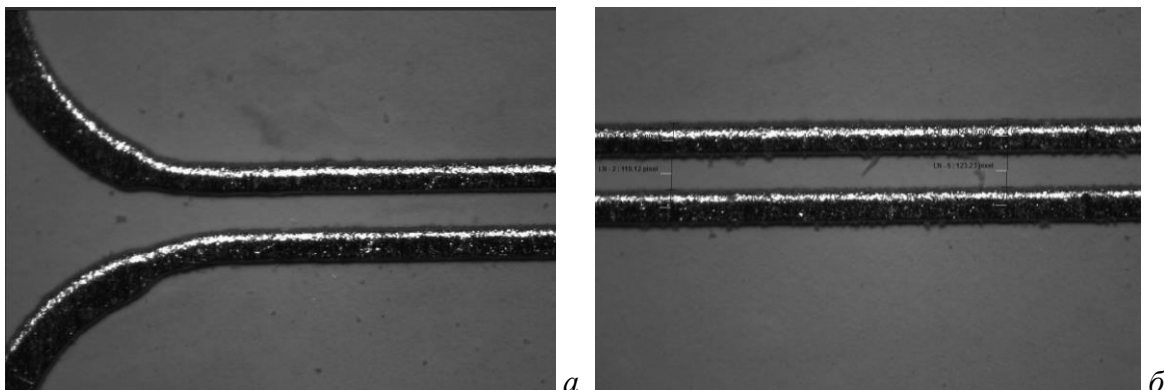
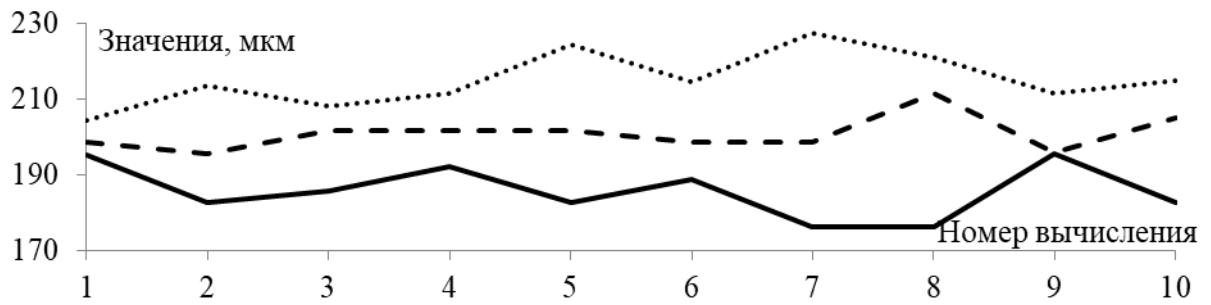


Рисунок 2.32 – Фрагменты 1 и 6 прототипа ПП с МР

Рисунок 2.33 – Зависимости w_1 (---), w_2 (.....) и s (—) от номера фрагмента

В таблицах 2.17 и 2.18 представлены вычисленные параметры структуры без и с МР. Видно, что Z без МР при измеренных w отличается от номинальных на 1,8%, а с МР Z и f_0 при измеренных w и s отличаются от номинальных на 0,9 и 0,8%, соответственно.

Таблица 2.17 – Параметры структуры без МР

Параметры	ϵ_r	h , мкм	t , мкм	w , мкм	τ , нс/м	Z , Ом
Номинальные	10,2	254	35	290	7,56	50,07
Измеренные				311	7,6	48,3

Таблица 2.18 – Параметры структуры с МР

Параметры	ϵ_r	h , мкм	t , мкм	w_1 , мкм	w_2 , мкм	s , мкм	$\Delta\tau$, нс/м	Z , Ом	f_0 , ГГц
Номинальные	10,2	254	35	200	200	175	1,19	49,49	6
Измеренные				200	215	186	1,17	48,6	6,08

2.1.2.4 Экспериментальные исследования в частотной области

На рисунке 2.34 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для однократного МР до и после отказов, измеренные в диапазоне частот от 10 МГц до 20 ГГц (рисунок 2.34а). Так как частотный диапазон ТЕМ-камеры ограничивается 5 ГГц, то отдельно приведены эти зависимости до 10 ГГц (рисунок 2.34б), где показаны полосы пропускания полезного сигнала для структур без и с МР до и после отказов на одном из концов проводника. Форма огибающей передаточной характеристики структуры обусловлена габаритами и электрическими параметрами структуры. Видно, что для структуры с МР до отказов (при $R_4=50$ Ом на рисунке 2.22б) $f_0=5,8$ ГГц. После отказа типа КЗ или ХХ при $R_4=K3$ и $R_4=XX$ $f_0=4,6$ ГГц. Для структуры без МР f_0 не наблюдается. На рисунке 2.34б видно, что полоса пропускания для структуры без МР $f_{cp}=7,8$ ГГц, а с МР при $R_4=50$ Ом (до отказов) $f_{cp}=2,5$ ГГц. После отказа типа КЗ или ХХ f_{cp} изменяется: при $R_4=K3$ $f_{cp}=2$ ГГц, а при $R_4=XX$ $f_{cp}=2,48$ ГГц. При этом в полосе пропускания после отказов наблюдаются резонансы из-за отражений. Таким образом, f_{cp} для ХХ и КЗ на одном конце пассивного проводника отличаются от цепи до отказов на 0,04 и 11%, соответственно, а f_0 – на 11,5%. На рисунке 2.35 представлены $|S_{21}|(f)$ от 10 МГц до 20 ГГц для структуры с МР до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. Отличия f_0 между моделированием и экспериментом для случаев 50–50, 50–КЗ и 50–ХХ составили 1,1, 2,3 и 2,6%, соответственно, а ослабления на f_0 – 6,9, 8,7 и 13,4%.

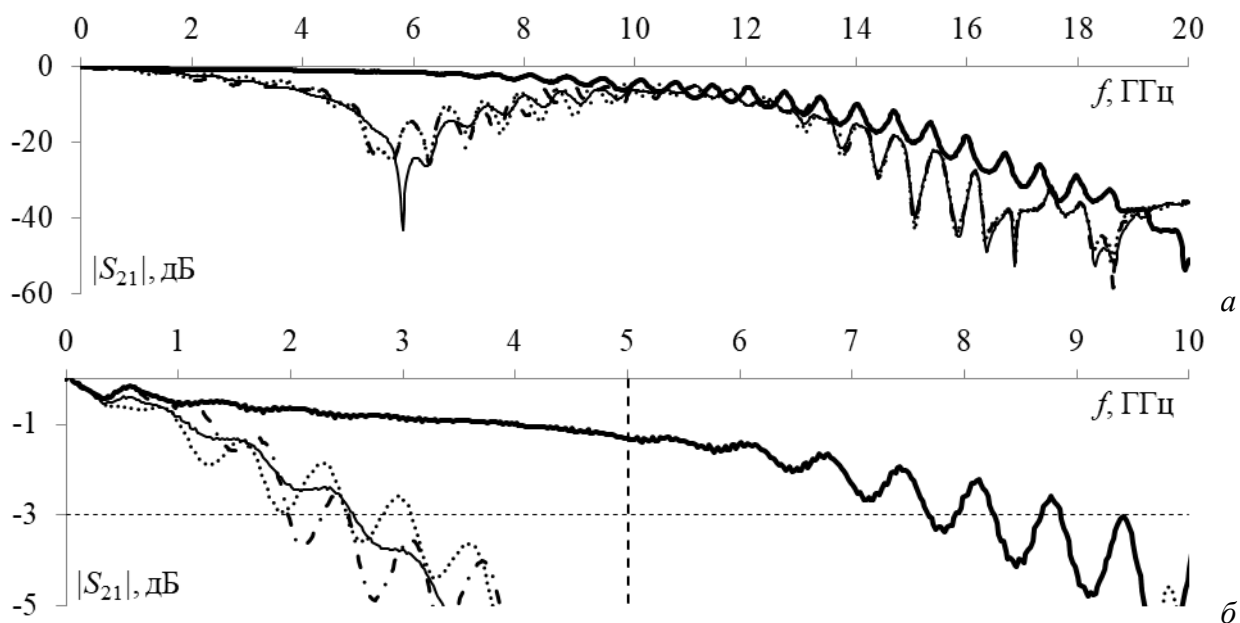


Рисунок 2.34 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ до 20 (а) и 10 (б) ГГц структуры без (—) и с МР, при $R=50 \text{ Ом}$ (---), КЗ (-·-) и ХХ (····)

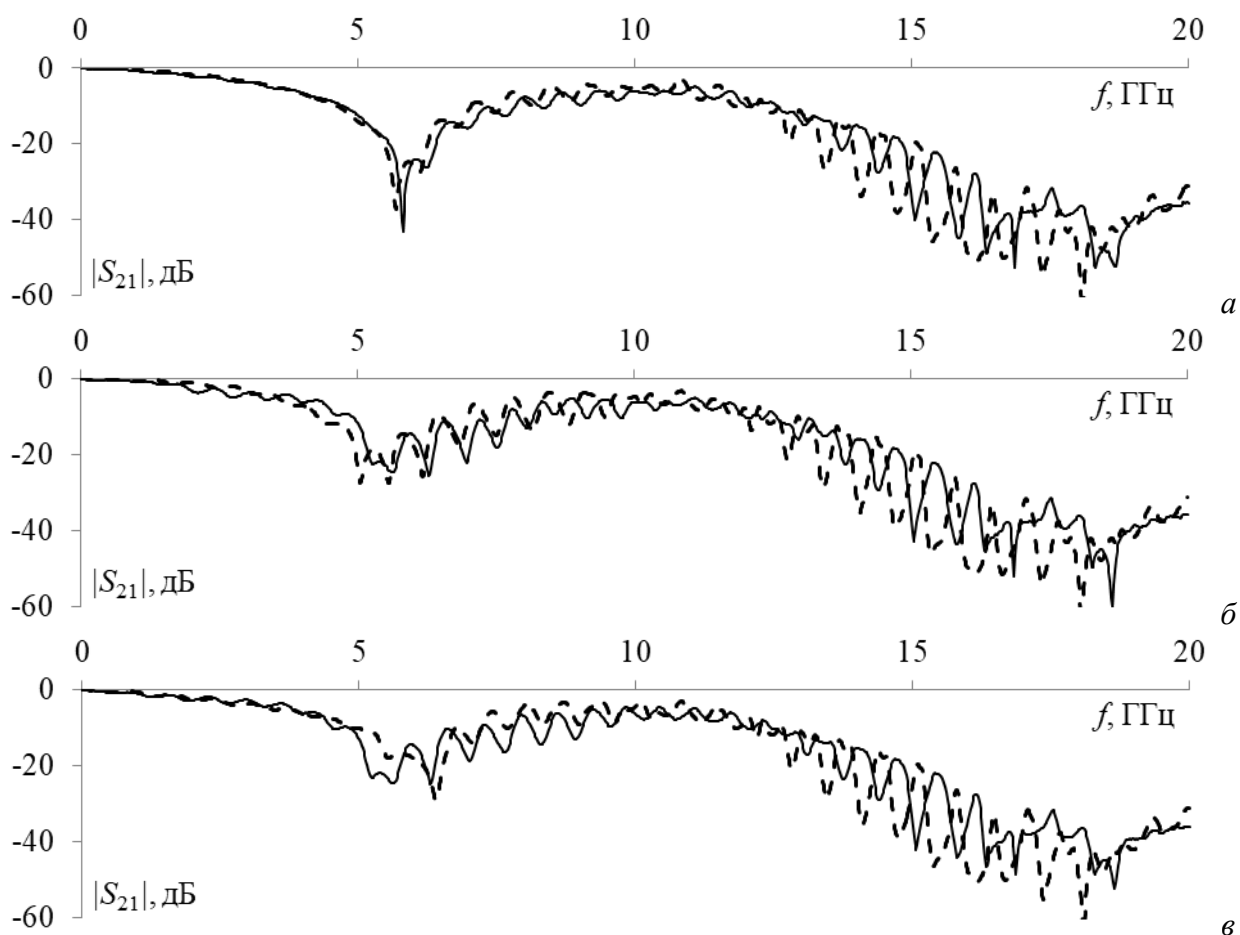


Рисунок 2.35 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 20 ГГц для структуры с однократным МР, полученные при электродинамическом моделировании (····) и эксперименте (---) при граничных условиях на ближнем и дальнем концах пассивного проводника 50-50 (а), 50-КЗ (б), 50-ХХ (в)

2.1.2.5 Экспериментальные исследования во временной области

На рисунке 2.36 представлены формы напряжения на ближнем и дальнем концах структуры без и с МР до и после отказа. На вход подавался трапецевидный импульс общей длительностью 150 (рисунок 2.36а) и 600 (рисунок 2.36б) пс с ЭДС 2 В. В первом случае длительность импульса выбиралась из соображений, что спектр данного импульса 20 ГГц (весь исследуемый частотный диапазон), а во втором – 5 ГГц (диапазон, допустимый при измерениях в ТЕМ-камере).

В случае на рисунке 2.36а в структуре с МР до и после отказа ослабление импульса помехи составляет 1,7 раза, при этом максимальное напряжение на дальнем конце активного проводника структуры $U_{\text{макс}}=0,6$ В. Однако, в данной структуре разложения не наблюдается, импульсы накладываются друг на друга.

В случае на рисунке 2.36б максимальное напряжение на дальнем конце активного проводника структуры $U_{\text{макс}}=1$ В. При этом формы напряжений для структур без и с МР практически не отличаются.

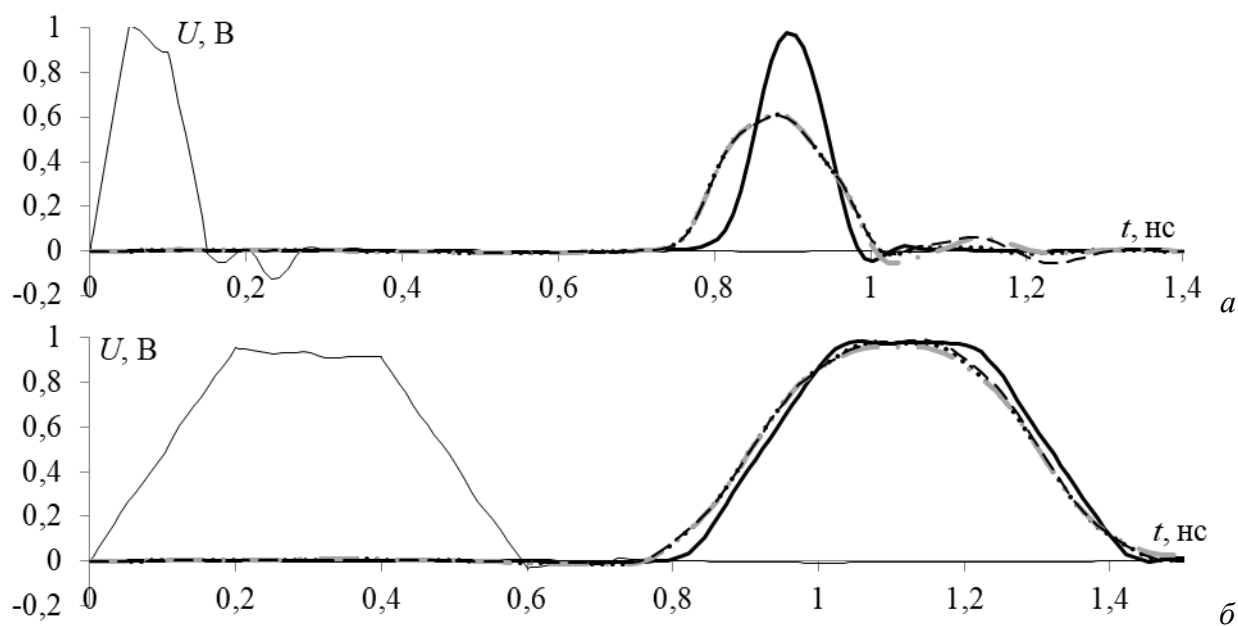


Рисунок 2.36 – Формы напряжения на ближнем (—) и дальнем концах структуры с МР при $R_4=50$ Ом (—), КЗ (---) и ХХ (.....), полученные при эксперименте, для импульсов с общей длительностью 0,15 (а) и 0,6 (б) нс

На рисунке 2.37 представлены формы напряжения на дальнем конце этой структуры для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. На вход подавался трапецевидный импульс общей длительностью 150 пс с ЭДС 2 В. Таким образом, различие $U_{\text{макс}}$ для эксперимента и электродинамического моделирования составило 1,3% для всех случаев до и после отказа. Задержки первого импульса для всех случаев до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании составили 3,7%.

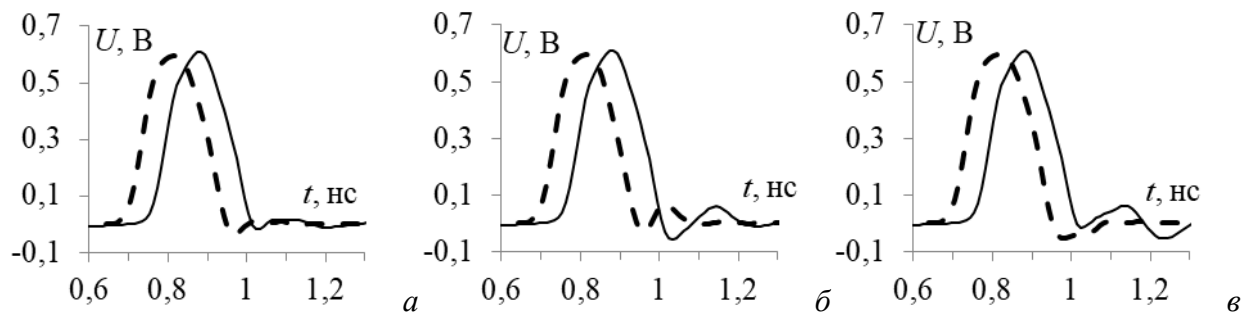


Рисунок 2.37 – Формы напряжения на дальнем конце структуры с МР, полученные при эксперименте (—) и моделировании (---) при $R_4=50$ Ом (а), КЗ (б) и ХХ (в)

2.2 Разработка новых способов однократного модального резервирования с двуслойной трассировкой проводников

Здесь представлены предложенные способы двуслойной трассировки [104–112].

2.2.1 Двуслойная трассировка резервированных цепей с боковой связью на противоположных сторонах печатной платы

Предложен способ [104] двуслойной трассировки резервированных цепей с боковой связью на противоположных сторонах ПП (рисунок 2.38а). Он включает трассировку резервируемых и резервных проводников одноименных цепей и проводников земли и питания. При этом резервируемый и резервный проводники прокладываются парами, параллельно друг другу, на одном слое, с минимально технологически допустимым зазором между ними так, что резервируемые и резервные проводники одноименных цепей проходят на противоположную сторону печатной платы, через переходные отверстия, а проводники земли и питания выполнены в виде отдельных слоев.

Данный способ улучшает возможности способа, представленного на рисунке 2.22, так как позволяет выполнять ортогональную двуслойную трассировку проводников. Поперечные сечения и эквивалентная схема для моделирования структуры общей длиной 0,5 м представлены на рисунке 2.38б.

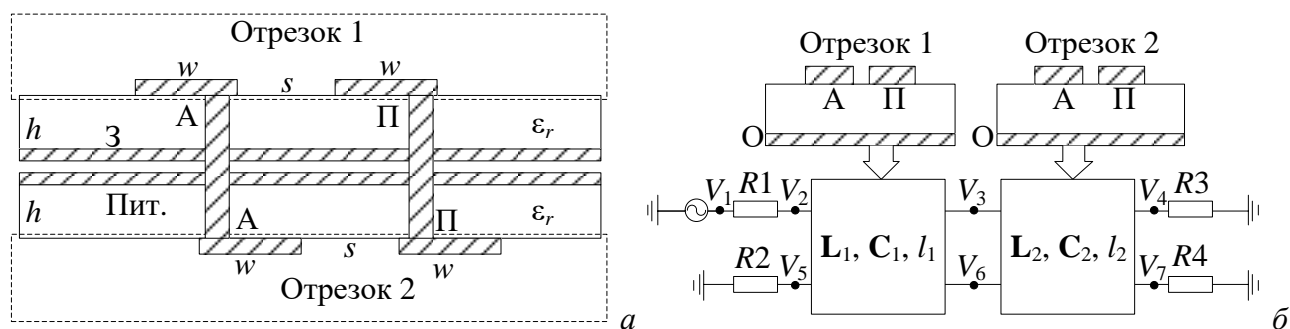


Рисунок 2.38 – Структура двуслойной трассировки проводников с резервированием на противоположных сторонах ПП, где проводники: А – активный, П – пассивный, З – земля, Пит – питание (а), поперечные сечения структур и эквивалентная схема для моделирования, где О – опорный проводник, l_1 и l_2 – длины структур на разных слоях ПП (б)

В таблице 2.19 приведены исходные параметры поперечного сечения. В качестве материала подложки выбран FR-4 с толщиной (h) и диэлектрической проницаемостью (ϵ_{r1}) толщину фольги (t) можно выбрать между 18, 35, 65 и 105 мкм, в данном случае $t=65$ мкм.

Таблица 2.19 – Исходные параметры структуры

Параметр	w , мм	t , мм	h , мм	s , мм	ϵ_{r1}
Значения	0,3	0,065	0,51	0,1	4,3

Эквивалентная схема для моделирования приведена на рисунке 2.38б. Импульсный трапециевидный сигнал с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс подавался на вход эквивалентной схемы для структур с длинами $l_1=0,25$ м и $l_2=0,25$ м. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод структуры. На рисунке 2.39 представлены формы напряжений на концах проводников. На дальнем конце активного проводника наблюдаются два импульса разложения по 0,468 В с задержками 2,97 и 2,821 нс, то есть $U_{\max}=0,468$ В, а разность задержек $\Delta t=149$ пс. На ближнем конце пассивного проводника наблюдается наводка с уровнем 0,255 В, а дальнем – два импульса разной полярности с уровнями 0,468 и 0,468 В, соответственно.

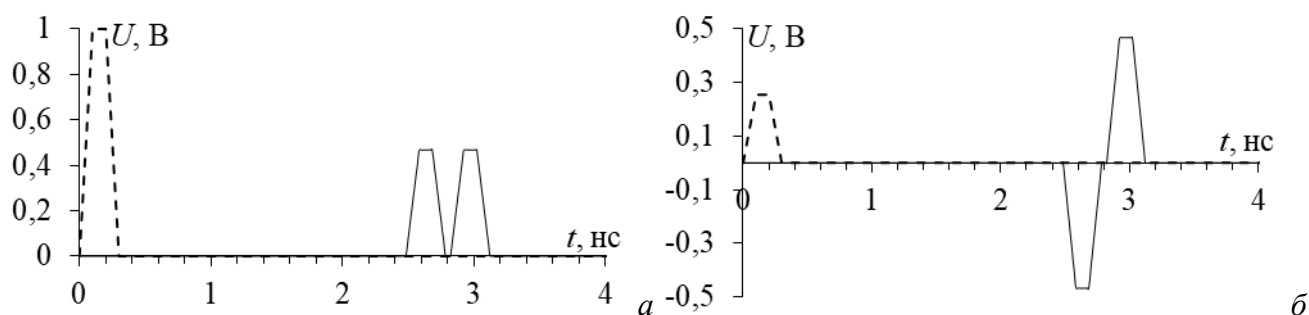


Рисунок 2.39 – Формы напряжения на ближнем (--) и дальнем (–) концах активного (а) и пассивного (б) проводников

Далее выполняется оптимизация параметров структуры эвристическим поиском. Оптимизировались параметры w , s в диапазоне от 0,1 до 1 мм, t – от 18 до 105 мкм по критериям согласования с трактом 50 Ом, максимизации Δt и минимизации $U_{\text{макс}}$. Оптимальные значения параметров для структуры с трактом 50 Ом сведены в таблицу 2.20.

Таблица 2.20 – Оптимальные параметры структуры

Параметр	w , мм	t , мм	h , мм	s , мм	ε_{r1}
Значение	0,65	0,105	0,51	0,1	4,3

На рисунке 2.40 представлены формы напряжений на концах проводников. На дальнем конце активного проводника наблюдаются два импульса разложения по 0,458 В с задержками 2,48 и 2,951 нс, то есть $U_{\text{макс}}=0,458$ В, а разность задержек $\Delta t=471$ пс. На ближнем конце пассивного проводника наблюдается наводка с напряжением 0,225 В, а на дальнем – два импульса разной полярности минус 0,458 и 0,458 В, соответственно.

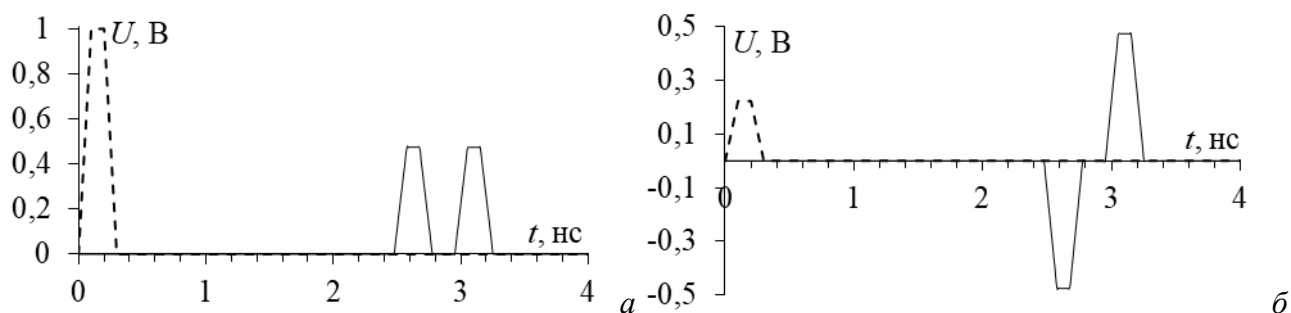


Рисунок 2.40 – Формы напряжения на ближнем (–) и дальнем (–) концах активного (а) и пассивного (б) проводников

Таким образом, результаты моделирования показывают, что предлагаемый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием позволяет, при ослаблении помехового импульса, облегчить трассировку печатных проводников за счет их размещения на противоположных сторонах ПП. Показано, что одновременная оптимизация по критериям согласования с трактом 50 Ом, максимизации Δt и минимизации $U_{\text{макс}}$ позволила уменьшить $U_{\text{макс}}$ всего на 2%, но увеличить Δt на 52% и при этом сохранить согласование с трактом 50 Ом. Отметим, что на рисунках 2.39б и 2.40б наблюдаются наводки на пассивный проводник.

Матрицы первичных и вторичных параметров сведены в таблицу 2.21.

Таблица 2.21 – Матрицы **C**, **L**, **Z** и **τ** для структуры с исходными и оптимальными параметрами

Матрицы	Исходный	Оптимальный
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 81,324 & -34,798 \\ -34,798 & 81,324 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 115,11 & -40,3986 \\ -40,3986 & 115,11 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 448,384 & 235,99 \\ 235,99 & 448,384 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 312,257 & 154,52 \\ 154,52 & 312,257 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 82,0257 & 39,26 \\ 39,26 & 82,0257 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 55,44 & 23,597 \\ 23,597 & 55,44 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 4,966 \\ 5,642 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,95 \\ 5,9 \end{bmatrix}$

2.2.2 Экранированная двуслойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью

Предложен способ [105] экранированной двуслойной трассировки резервированных цепей с лицевой связью (рисунок 2.41а). Он включает взаимное расположение резервируемой и резервной ПП, компоновку и трассировку резервируемой и резервной ПП. При этом, опорный проводник выполнен в виде отдельных слоев на резервируемой и резервной ПП, резервируемая и резервная ПП склеиваются слоем диэлектрика. Способ отличается тем, что каждая из резервируемой и резервной плат выполнена из двух слоев диэлектрика, на внешней стороне одного из которых и внутри которых трассируются отрезки резервируемого и резервного проводников, образующие структуры связанных ЛП. При склеивании резервируемой и резервной ПП образуется многослойная ПП, в которой отрезки резервируемого и резервного проводников, расположенные на внешних сторонах одного из слоев диэлектрика резервируемой и резервной ПП, располагаются параллельно и друг под другом в склеивающем слое диэлектрика, а слои опорного проводника располагаются на противоположных внешних сторонах резервируемой и резервной ПП и образуют внешние стороны многослойной ПП.

Данный способ улучшает возможности трассировки способа, представленного на рисунке 2.4а. На рисунке 2.42 представлена эквивалентная схема данного способа. Поперечные сечения для моделирования структуры общей длиной 0,5 м представлены на рисунке 2.41. Для моделирования использованы значения параметров поперечного сечения, которые сведены в таблицу 2.22.

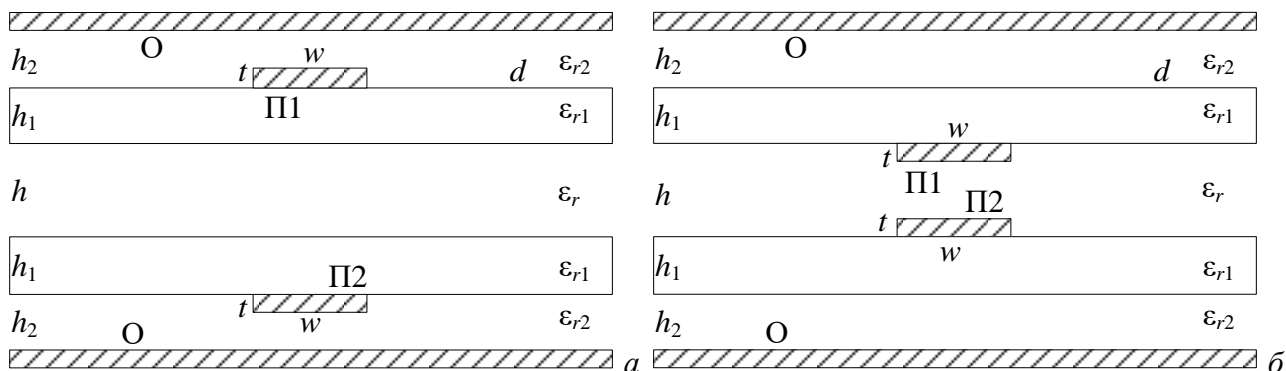


Рисунок 2.41 – Поперечные сечения для моделирования структур с резервированием на внешних (а) и внутренних (б) сигнальных слоях многослойной печатной платы, где проводники:

А – активный; О – опорный; П – пассивный

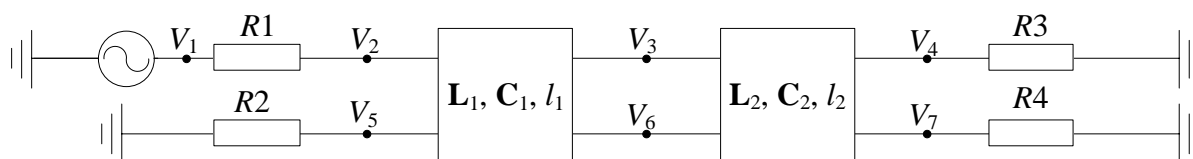


Рисунок 2.42 – Эквивалентная схема для моделирования

Таблица 2.22 – Параметры структуры до оптимизации

Параметр	w , мм	t , мм	h , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	ϵ_r	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
Значение	200	0,035	510	206	206	3	4,3	4,3

Эквивалентная схема для моделирования структуры приведена на рисунке 2.42. СШП импульс с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс подавался на вход эквивалентной схемы для структуры общей длиной 0,5 м. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. На рисунке 2.43 представлены формы напряжений на ближнем и дальнем концах активного и пассивного проводников. На дальнем конце активного проводника наблюдается импульс (это два не полностью разложившихся импульса с примерными амплитудами 0,45 В и задержками 3,1 и 3,3 нс, слившиеся из-за наложения спада первого на фронт второго). На ближнем конце пассивного проводника наблюдается наводка с напряжением 0,255 В, а на дальнем – два импульса разной полярности 0,468 и минус 0,468 В, соответственно.

Поперечное сечение для моделирования представлено на рисунке 2.41. Оптимизировались параметры w , h , s в диапазоне от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1 мм по критериям согласования, временному и амплитудному. Оптимальные параметры для структуры сведены в таблицу 2.23.

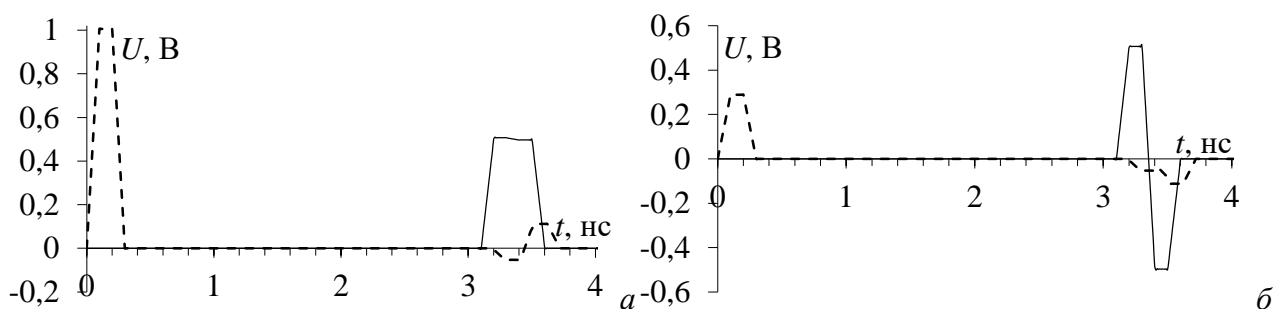


Рисунок 2.43 – Формы напряжения на ближнем (--) и дальнем (–) концах активного (а) и пассивного (б) проводников

Таблица 2.23 – Параметры после оптимизации

Параметр	w , мм	t , мм	h , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	ϵ_r	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
Значение	185	0,035	600	130	130	4,3	10,2	10,2

Эквивалентная схема для моделирования структуры приведена на рисунке 2.42. СШП импульс с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 50 пс подавался на вход эквивалентной схемы для структуры длиной 0,5 м. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. На рисунке 2.44 представлены формы напряжений на ближнем и дальнем концах активного и пассивного проводников. На дальнем конце активного проводника наблюдается импульс (это два не полностью разложившихся импульса с примерными амплитудами 0,495 В и задержками 3,95 и 4,9 нс, слившиеся из-за наложения спада первого на фронт второго). На ближнем конце пассивного проводника наблюдается наводка с напряжением 0,41 В, а на дальнем – два импульса разной полярности 0,495 и минус 0,495 В, соответственно.

Матрицы первичных и вторичных параметров сведены в таблицу 2.24.

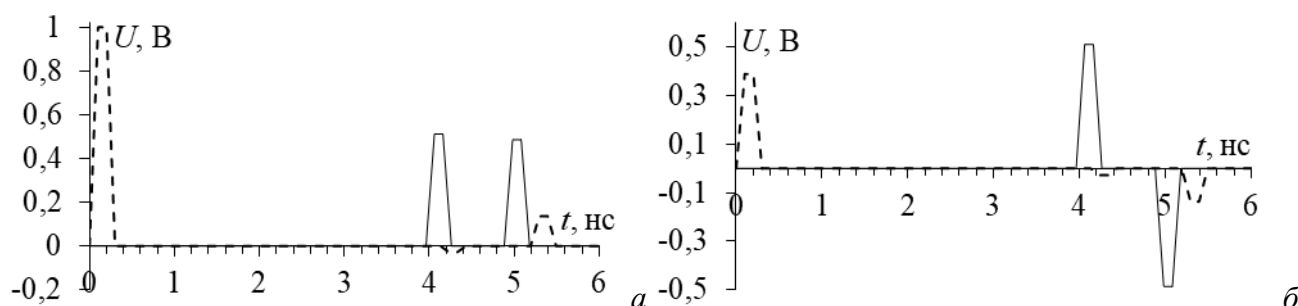


Рисунок 2.44 – Формы напряжения на ближнем (--) и дальнем (–) концах активного (а) и пассивного (б) проводников

Таблица 2.24 – Матрицы первичных и вторичных параметров

Слои	C , пФ/м	L , нГн/м	Z , Ом	τ , нс/м
Внешние	$\begin{bmatrix} 79,151 & -19,98 \\ -19,98 & 79,151 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 511,699 & 102,78 \\ 102,78 & 511,699 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 83,06 & 18,837 \\ 18,837 & 83,06 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6,03 \\ 6,37 \end{bmatrix}$
Внутренние	$\begin{bmatrix} 112,35 & -62,73 \\ -62,73 & 112,35 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 543,847 & 276,371 \\ 276,371 & 543,847 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 83,83 & 44,74 \\ 44,74 & 83,83 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6,379 \\ 6,843 \end{bmatrix}$

2.2.3 Двуслойная трассировка резервированных цепей с боковой связью в двуслойном диэлектрике

2.2.3.1 Одновариантный анализ

Предложен способ [106] двуслойной трассировки резервированных цепей с боковой связью в двуслойном диэлектрике (рисунок 2.45). Он включает трассировку проводников резервируемой и резервной цепей с опорным проводником в виде отдельного слоя. Резервируемые и резервные проводники прокладываются парами, параллельно друг другу, на одном слое, с минимально технологически допустимым зазором между резервируемым и резервным проводниками. Способ отличается тем, что печатная плата образована двумя слоями диэлектрика, на внешней стороне одного из которых и между которыми трассируются пары отрезков резервируемого и резервного проводников, отрезки резервируемого и резервного проводников, расположенные на внешнем и во внутреннем слоях ПП, образуют структуру связанной ЛП. При этом часть, занимаемая длиной отрезков резервируемого и резервного проводников, расположенных на внешнем слое двуслойной печатной платы, от общей длины структуры связанной ЛП, определяется соотношением: $l_1/(l_1 + l_2)$, где l_1 – длина отрезков резервируемого и резервного проводников, расположенных на внешнем слое двуслойной печатной платы, l_2 – длина отрезков резервируемого и резервного проводников, расположенных во внутреннем слое двуслойной печатной платы.

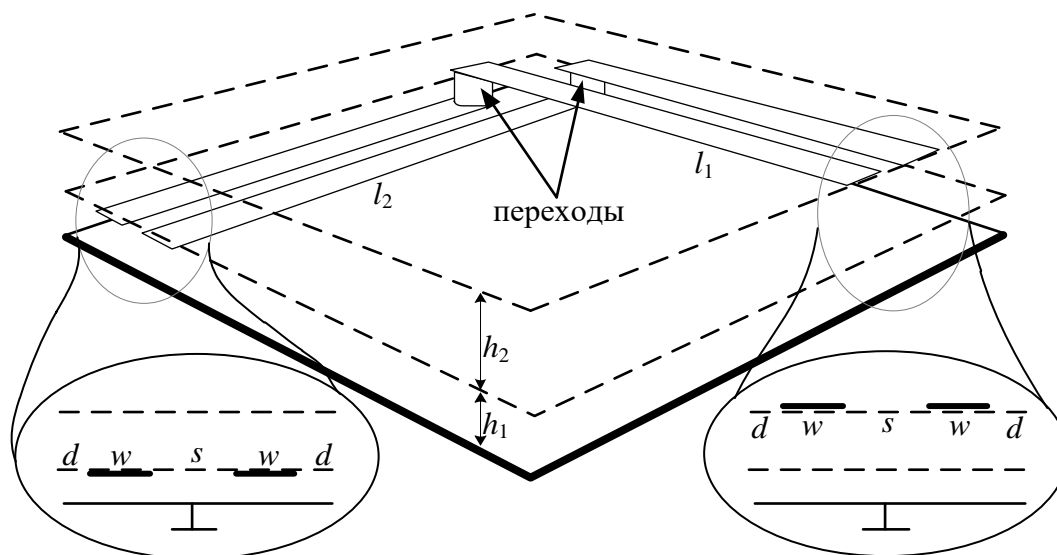


Рисунок 2.45 – Двуслойная трассировка резервированных цепей с боковой связью в двуслойном диэлектрике

Поперечное сечение для моделирования структур с проводниками на внешнем и внутреннем слоях представлено на рисунке 2.46. Сначала проводится анализ данных структур по отдельности, когда структуры не соединены между собой переходными отверстиями, но расположены на одной ПП. В таблицу 2.25 сведены параметры поперечных сечений структур.

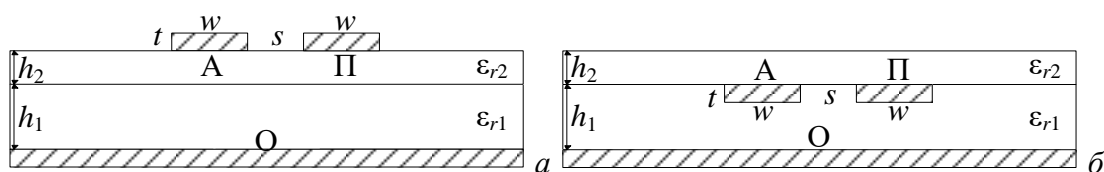


Рисунок 2.46 – Поперечные сечения для моделирования структур с резервированием на внешнем (а) и внутреннем (б) сигнальных слоях печатной платы, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

Таблица 2.25 – Параметры структуры с МР до оптимизации

Параметр	w , мм	t , мм	h , мм	h , мм	s , мм	ϵ_{r1}	ϵ_{r1}
Значение	0,2	0,7	0,2	0,2	0,2	3	4

В таблице 2.26 сведены матрицы погонных коэффициентов электростатической (**L**) и электромагнитной (**C**) индукций, потерь в проводниках (**R**) и диэлектриках (**G**) вычисленных в TALGAT и ADS. Также рассматриваются отклонения (Δ) собственных и взаимных коэффициентов матриц **L**, **C**, **R**, **G** для структур на внешнем и внутреннем слоях, рассчитанные в ADS и TALGAT. Видно, что отклонения для **L** и **C** не превышают 1% для обеих структур, а для **R**, **G** достигают 11,4%, для **R**, что объяснимо её приближенным вычислением в TALGAT.

Таблица 2.26 – Матрицы погонных коэффициентов **L** и **C**, потерь **R** и **G** в TALGAT и ADS

	TALGAT	ADS	$\Delta = \left \frac{\text{ADS} - \text{TALGAT}}{\text{ADS} + \text{TALGAT}} \right , \%$
	Внешний слой		
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 61,85 & -18,5 \\ -18,5 & 61,85 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 62,82 & -18,89 \\ -18,89 & 62,82 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,8 & 0,1 \\ 0,1 & 0,8 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 475,3 & 181,6 \\ 181,6 & 475,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 477,5 & 181,7 \\ 181,7 & 477,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,4 & 0,02 \\ 0,02 & 0,4 \end{bmatrix}$
R , Ом/м	$\begin{bmatrix} 22,12 & 2,54 \\ 2,54 & 22,12 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 22,34 & 2,5 \\ 2,5 & 22,34 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,4 & 0,8 \\ 0,8 & 0,4 \end{bmatrix}$
G , мСм/м	$\begin{bmatrix} 2,9 & -0,6 \\ -0,6 & 2,9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2,99 & -0,68 \\ -0,68 & 2,99 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,5 & 6,25 \\ 6,25 & 1,5 \end{bmatrix}$
Внутренний слой			
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 121,59 & -26,5 \\ -26,5 & 121,59 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 122,36 & -26,8 \\ -26,8 & 122,36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,3 & 0,6 \\ 0,6 & 0,3 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 290 & 53,6 \\ 53,6 & 290 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 290 & 53,6 \\ 53,6 & 290 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{bmatrix}$
R , Ом/м	$\begin{bmatrix} 27,56 & 3,56 \\ 3,56 & 27,56 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 21,89 & 3,2 \\ 3,2 & 21,89 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 11,4 & 5,3 \\ 5,3 & 11,4 \end{bmatrix}$
G , мСм/м	$\begin{bmatrix} 7,4 & -1,6 \\ -1,6 & 7,4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7,47 & -1,67 \\ -1,67 & 7,47 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,47 & 2,1 \\ 2,1 & 0,47 \end{bmatrix}$

В таблице 2.27 сведены матрицы модальных напряжений (**E**), погонные задержки четной (τ_e) и нечетной (τ_o) мод, а также их разность ($\Delta\tau$) для ЛП на внешнем и внутреннем слоях структуры с МР. В матрице **E** столбец с положительным и отрицательным значением отвечает за нечетную моду, а двумя положительными – за четную, а их расположение в матрице **E** говорит о том, какая мода придет первая на дальнем конце исследуемых структур. Для структур на внешнем и внутреннем слоях более быстрой будет нечетная и четная моды, соответственно.

Таблица 2.27 – Матрицы модальных напряжений, погонные задержки четной и нечетной мод и их разности для внешнего и внутреннего слоев

	Внешний слой	Внутренний слой
S_v , В	$\begin{bmatrix} 0,707 & 0,707 \\ -0,707 & 0,707 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,707 & 0,707 \\ 0,707 & -0,707 \end{bmatrix}$
τ_e , нс/м	5,33704	5,71528
τ_o , нс/м	4,85761	5,9178
$\Delta\tau$, нс/м	-0,479439	0,20252

На рисунке 2.47 представлена эквивалентная схема для моделирования структур на внешнем и внутреннем слоях по отдельности. На вход структуры с длиной 1 м подавался

импульс с ЭДС 2 В и общей длительностью 150 пс. На рисунке 2.48 представлены формы импульсов ЭДС, напряжений на ближнем и дальнем концах структуры, расположенной только на внешнем слое, и структуры расположенной только на внутреннем слое. На ближнем конце наблюдается импульс с $U_{\text{макс}}=1$ В. На дальнем конце наблюдаются два импульса для каждой из структур с порядком импульсов четных и нечетных мод, как описано выше.

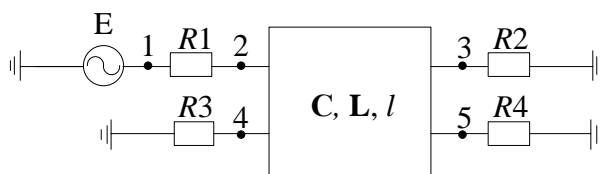


Рисунок 2.47 – Эквивалентная схема

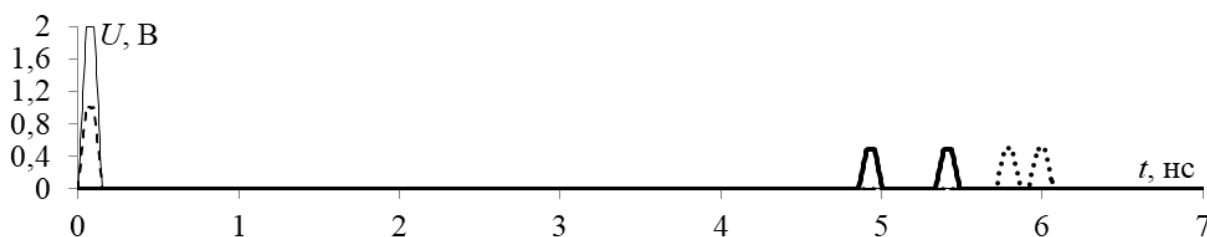


Рисунок 2.48 – Формы напряжения в узлах V0 (—), V1 (- - -) и V3 активного проводника для структур, расположенных только на внешнем (—) и только внутреннем (•••) слоях ПП

Далее исследуется структура (рисунок 2.49) состоящая из отрезков ЛП на внешнем и внутреннем слоях ПП. На рисунке 2.49 представлена эквивалентная схема данного способа. На рисунке 2.50а представлены зависимости разности задержек (Δt) в узле V3 от значения $l_1 / (l_1 + l_2)$, показывающего часть, занимаемую отрезком 1 (внешний слой) из рисунка 2.49 от общей длины. Таким образом, разность задержек зависит от длин каждого из участков в двуслойной печатной плате. Видно, что при значении отношения 0,3, разность задержек равна 0. Это объясняется противоположными знаками разностей τ_e и τ_o на внешнем и внутреннем слоях ПП, которая описана выше. Таким образом, при последовательном подключении этих структур эти разности взаимно компенсируются.

Импульсная помеха подавалась между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником, а функцию резервной трассы выполнял пассивный проводник. На рисунке 2.50б приведены формы напряжения в узле V3 активного проводника при $l_1/(l_1+l_2)=0,1, 0,3, 0,9$. Максимальные амплитуды ($U_{\text{макс}}$) импульсов разложения в точке V3 при этом равны 0,38, 0,7, 0,8 В, а разности задержек – 0,2, 0 и 0,4 нс.

Эквивалентная схема (рисунок 2.49) в системе TALGAT была разбита на 20 сегментов: 10 на внешнем и на внутреннем слоях. На рисунке 2.51 представлены зависимости N-норм от номера сегмента.

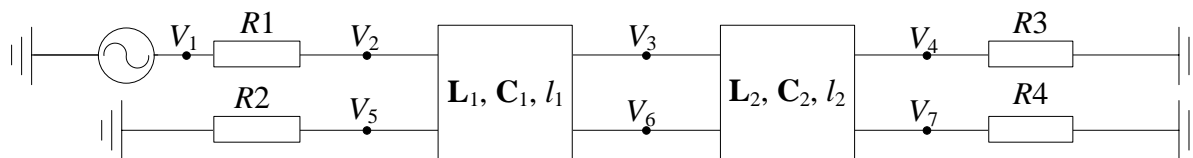
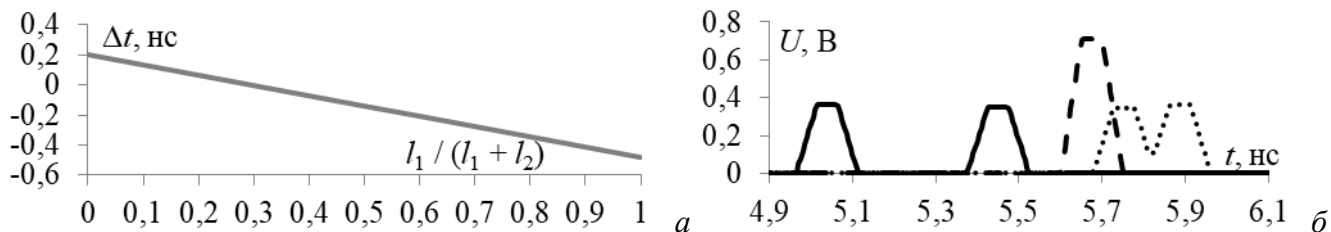
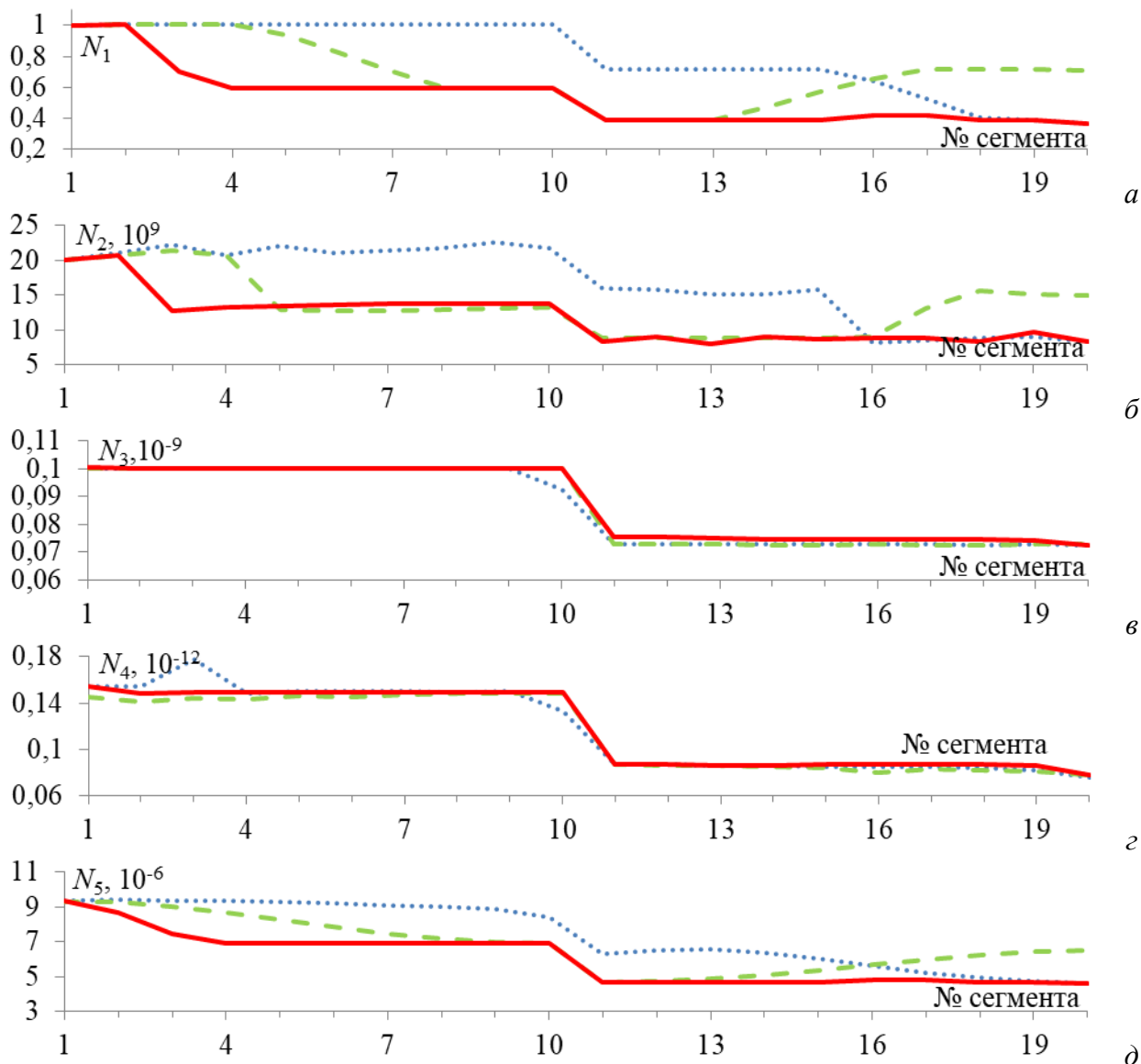


Рисунок 2.49 – Эквивалентная схема для моделирования двуслойной трассировки

Рисунок 2.50 – Зависимость разности задержек (Δt) импульсов в узле V_3 от $l_1 / (l_1 + l_2)$ (a), формы напряжения в узле V_3 при $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1$ (•••), $0,3$ (- - -), $0,9$ (—) (b)Рисунок 2.51 – Зависимости N -норм от номера сегмента при $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1$ (•••), $0,3$ (- - -), $0,9$ (—)

На ближнем конце ЛП $N_1=1$ для трех соотношений длин. С приближением к дальнему концу ЛП для соотношения длин 0,1 и 0,9 N_1 постепенно уменьшается до 0,4 (сегмент 20). Для 0,3 N_1 сначала уменьшается до 0,4 (сегмент 11), но к сегменту 20 увеличивается до 0,75. Таким образом, как видно из рисунка 2.51а, вероятность сбоя схемы / электрического пробоя / дуговых эффектов для соотношения длин 0,9 по всей длине ЛП меньше, чем для 0,1 и 0,3.

На ближнем конце ЛП $N_2=20$ (в 10^9 степени, далее по тексту) для трех соотношений длин. С приближением к дальнему концу ЛП для соотношения 0,9 N_2 постепенно уменьшается до 8 (сегмент 20). Для 0,3 N_2 сначала уменьшается до 8 (сегмент 11), но к сегменту 20 увеличивается до 15. Для 0,1 N_2 на сегменте 9 увеличивается до 22,5, а к сегменту 20 уменьшается до 8. Таким образом, как видно из рисунка 2.51б, вероятность искрения компонента / сбоя схемы для соотношения длин 0,9 по всей длине ЛП меньше, чем для 0,1 и 0,3.

На ближнем конце ЛП $N_3=0,1$ (в 10^{-9} степени, далее по тексту) для трех соотношений длин. На сегменте 11 для соотношений 0,1, 0,3 и 0,9 N_3 уменьшается примерно до 0,73 и сохраняется до сегмента 20. Таким образом, как видно из рисунка 2.51в, вероятность диэлектрического пробоя для трех соотношений уменьшается одинаково.

На ближнем конце ЛП N_4 для соотношений 0,1, 0,3 и 0,9 равны 0,16, 0,15 и 0,16 (в 10^{-12} степени, далее по тексту), соответственно. На сегменте 11 для трех соотношений N_4 уменьшается до 0,8 и постепенно уменьшается до 0,7 на дальнем конце (сегмент 20). Таким образом, как видно из рисунка 2.51г, вероятность повреждения оборудования для трех соотношений уменьшается приблизительно одинаково.

На ближнем конце ЛП $N_5=9,2$ (в 10^{-6} степени, далее по тексту) для трех соотношений длин. С приближением к дальнему концу ЛП для соотношения длин 0,1 и 0,9 N_5 постепенно уменьшается до 4,5 (сегмент 20). Для 0,3 N_5 сначала уменьшается до 4,5 (сегмент 11), но к сегменту 20 увеличивается до 6,5. Таким образом, как видно из рисунка 2.51д, вероятность выгорания компонента для соотношения длин 0,9 по всей длине ЛП меньше, чем для соотношений 0,1 и 0,3.

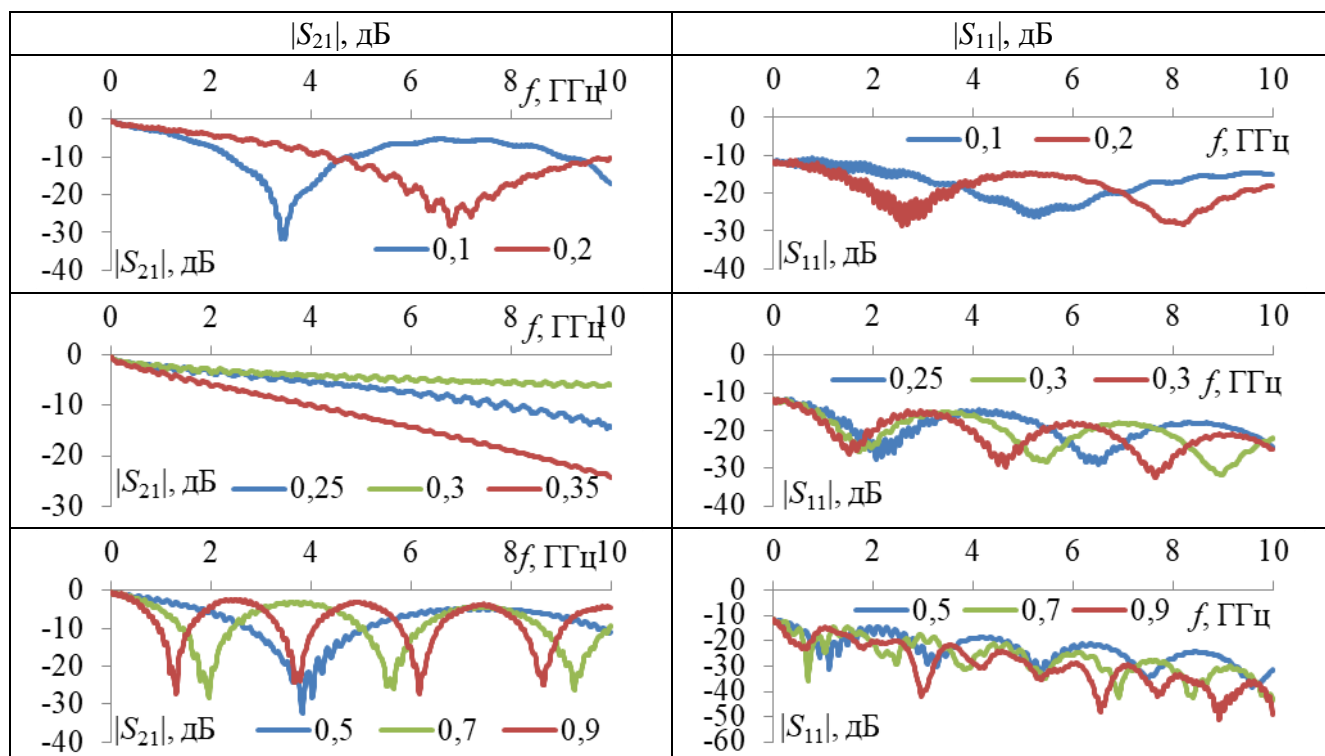
Таким образом, для соотношения 0,9 вероятность всех типов отказов, которые описываются N -нормами по всей длине структуры, меньше чем для соотношений 0,1 и 0,3.

2.2.3.2 Анализ целостности сигнала

Выполнен анализ целостности сигнала в системе ADS с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. В таблице 2.28 представлены частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ при изменении $l_1 / (l_1 + l_2)$ от 0,1 до 0,9. При соотношении длин 0,1 и 0,2 наблюдаются резонансные частоты (f_0), это говорит о том, что на этих частотах можно добиться более сильного ослабления. Для соотношения 0,2 наблюдаются дополнительные резонансы, что говорит о наличии отражений в

ЛП. Полосы пропускания (f_{cu}) равны по 0,73 и 1,05 ГГц, соответственно. При соотношении длин 0,25, 0,3 и 0,35 f_0 не наблюдаются, так как Δt близка к 0 в случаях 0,25 и 0,35. В случае 0,3 Δt равна 0, также наклон огибающей здесь минимален, f_{cu} равны 1,14, 1,33 и 0,56 ГГц, соответственно. При соотношении длин 0,5, 0,7 и 0,9 наблюдаются увеличение количества резонансов от до 4, а f_{cu} равны по 0,97, 0,49, 0,44 ГГц, соответственно. $|S_{11}|$ на ближнем конце для всех рассмотренных случаев не превышает 10 дБ.

Таблица 2.28 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ при $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1 - 0,9$



Выбор скорости передачи данных должен быть обусловлен полосой пропускания структуры с МР до и после отказов. Для исследуемой структуры наименьшая частота среза составила 440 МГц. На рисунке 2.52 представлены глазковые диаграммы, полученные при прохождении псевдослучайной битовой последовательности (ПСБП) в ЛП при $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1, 0,3, 0,9$. В данном исследовании использован источник ПСБП размерностью 440000 бит и скоростью передачи данных 440 Мбит/с (значение обусловлено полосой пропускания структуры с МР). В таблице 2.29 обобщены основные параметры полезного сигнала.

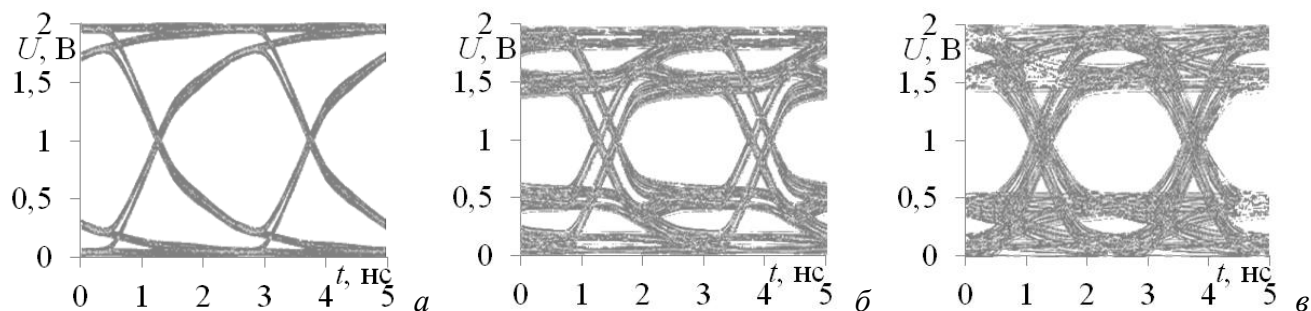


Рисунок 2.52 – Глазковые диаграммы при $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1$ (а), 0,3 (б), 0,9 (в)

При увеличении $l_1 / (l_1 + l_2)$ целостность сигнала сильно ухудшается, так как две эти структуры рассогласованы. Это подтверждает важность согласования структур на внешних и внутренних слоях. Также такое сильное ухудшение целостности сигнала объясняется довольно большой общей длиной ЛП 1 м.

Таблица 2.29 – Параметры полезного сигнала

Параметры	0,1	0,3	0,9
Фазовое отклонение, пс	149	375	325
Ширина «глаза», нс	2,387	2,07	2,11
Высота «глаза», мВ	1400	650	750
Амплитудное отклонение, мВ	100	0,67	0,65

2.2.3.3 Сравнение систем моделирования и выводы

На рисунке 2.53 представлено сравнение результатов моделирования в TALGAT и ADS, в обоих случаях выполненное с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Формы напряжения представлены для $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1, 0,3, 0,9$. Максимальное различие $U_{\text{макс}}$ составляет 3%, что говорит о хорошей согласованности результатов. Таким образом, систему TALGAT можно использовать при анализе способа трассировки межсоединений на двух сигнальных слоях ПП с МР.

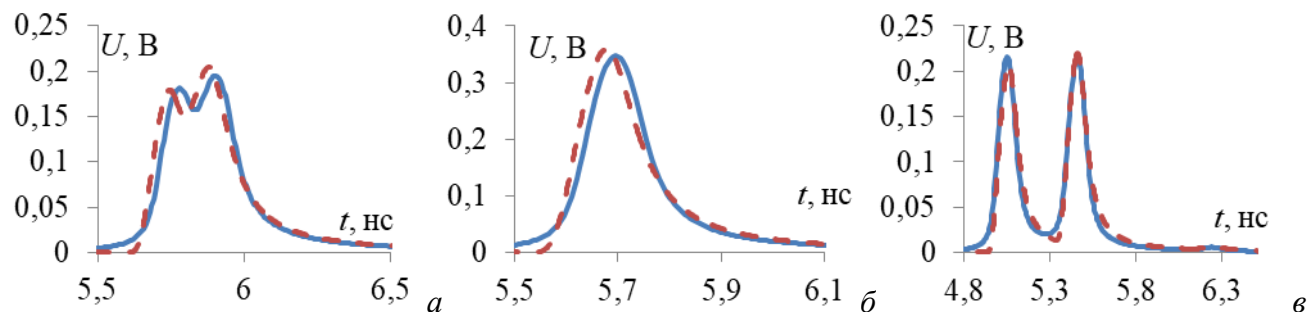


Рисунок 2.53 – Формы напряжения на дальнем конце структуры с МР, полученные в TALGAT (—) и ADS (- -) при 0,1 (а), 0,3 (б) и 0,9 (в)

В итоге, выполнен анализ защитных характеристик в системе TALGAT без потерь. Показано, что для $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,9$ вероятность всех типов отказов, которые описываются N -нормами, по всей длине структуры меньше, чем для соотношений 0,1 и 0,3. Проведен анализ целостности сигнала в системе ADS с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Выбор скорости передачи данных должен быть обусловлен полосой пропускания структуры с МР до и после отказов. Для исследуемой структуры наименьшая частота среза составила 440 МГц. Выявлено, что с ростом $l_1 / (l_1 + l_2)$ целостность сигнала сильно ухудшается. Показано, что наибольшее внимание (с точки зрения полезного сигнала) следует уделять согласованию структур с проводниками на внешних и внутренних слоях между собой, а также общей длине структуры. Представлено сравнение моделирования в TALGAT и ADS, в обоих случаях

выполненное с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Формы напряжения представлены для $l_1 / (l_1 + l_2) = 0,1, 0,3, 0,9$ систему TALGAT можно использовать при анализе способа трассировки межсоединений на двух сигнальных слоях ПП с МР.

Результаты моделирования показывают, что предлагаемый способ, при ослаблении помехового импульса, позволяет обеспечить трассировку печатных проводников цепей с резервированием, за счет введения дополнительного внутреннего сигнального слоя. Результаты будут полезны при проектировании реальных ЛП с МР на основе способа трассировки межсоединений на двух сигнальных слоях печатной платы с МР.

2.3 Основные результаты раздела

1. Выполнены квазистатическое и электродинамическое моделирование, а также экспериментальное исследование структуры и прототипа ПП с однослойной трассировкой резервированных цепей с лицевой связью с МР. Из зависимостей $|S_{21}|$ от частоты при эксперименте и электродинамическом моделировании видно, что структура до и после отказов подобна фильтру нижних частот. Показано, что при электродинамическом моделировании f_{cp} для ХХ и КЗ на одном конце пассивного проводника отличаются от цепи в рабочем состоянии на 5,2 и 50%, а f_0 – на 0,8 и 22%, соответственно. При эксперименте, f_{cp} для ХХ и КЗ на одном конце пассивного проводника отличаются от цепи в рабочем состоянии на 9,8 и 45%, а резонансные частоты – на 1,8 и 19%, соответственно. Максимальные различия f_{cp} и f_0 между экспериментом и электродинамическим моделированием составляют 5,9 и 6,2%, соответственно.

2. Выполнен квазистатический анализ характеристик структуры с однослойной трассировкой резервированных цепей с боковой связью с МР с дополнительными проводниками. Показано, что в структуре с большим количеством мод возникает возможность перераспределять энергию по этим модам и уменьшать U_{max} . Это видно для структуры с 1, 2 и 4 дополнительными проводниками, так как там возможно уменьшить U_{max} на 23,4, 27,6 и 34%, соответственно. Показано, что с увеличением длительности входного импульса помехи, импульсы разложения в структурах с дополнительными проводниками накладываются друг на друга, и U_{max} увеличивается. Так, U_{max} для структур с 1, 2, 3 и 4 дополнительными проводниками больше, чем для двухпроводной структуры, на 27,6, 27,6, 51,1 и 44,7%, соответственно. Показано, что $K_{C12-K_{L12}}$, с добавлением 1 дополнительного проводника, увеличивается на 9,4%, а с добавлением 2 – незначительно уменьшается на 2% относительно двухпроводной структуры. Это говорит о том, что наводка на дальнем конце между

резервируемым и резервным проводниками будет меньше, если добавленный дополнительный проводник будет зарезервирован.

3. Для измерения излучений в ТЕМ-камере разработаны ПП с МР с размерами 98*98 мм с отступами в 10 мм. Исследованы временные и частотные характеристики ПП. Показано, что реализация МР уменьшает полосу пропускания.

4. Предложены новые способы двуслойной трассировки резервированных цепей. Результаты моделирования показывают, что предлагаемые способы трассировки печатных проводников цепей с резервированием позволяет, при ослаблении помехового импульса, облегчить трассировку печатных проводников ПП.

3. ДВУКРАТНОЕ МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Здесь представлены результаты исследований двукратного МР [113–115].

3.1 Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием

Предложен способ [113] трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием (рисунок 3.1). Наиболее близким к нему по техническому решению является выбранный за прототип способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием (описан в подпункте 1.2.1.1). Он включает трассировку резервируемых и резервных проводников с опорным проводником в виде отдельного слоя. Резервируемая и резервная цепи имеют один опорный проводник, резервируемые и резервные проводники одноименных цепей прокладываются парами, параллельно друг другу, на одном слое, с минимально технологически допустимым зазором между резервируемым и резервным проводниками, вдоль которых этот зазор заполняется материалом с ϵ_r большей, чем у подложки печатной платы. Недостатками этого способа являются малые надежность и помехозащищенность.

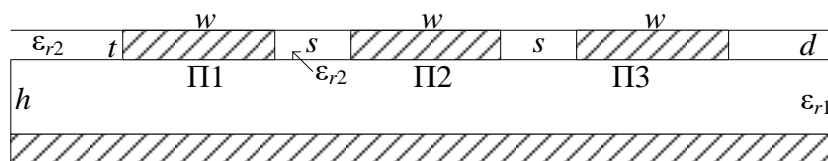


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение структуры с двукратным резервированием, где проводники: О – опорный; П1, П2 и П3 – резервируемые проводники

Предложенный способ отличается от описанного выше тем, что введен дополнительный резервный проводник на таком же расстоянии, как между прежними проводниками, а резервируемым выбирается средний проводник. Техническим результатом является повышение надежности, за счет увеличения кратности резервирования, и помехозащищенности, за счёт увеличения длительности импульса помехи, который будет разлагаться полностью. Технический результат достигается за счет того, что помеховый сигнал, длительность которого меньше разности задержек четной и нечетной мод в структуре связанной ЛП, образованной тремя проводниками резервируемой и резервных цепей, подвергается модальным искажениям: разложению на импульсы меньшей амплитуды (при рассмотрении сигнала во временной области).

Достижимость технического результата продемонстрирована на примере распространения импульсной помехи с ЭДС 2 В с длительностями фронтов и плоской вершины 200 пс в структуре связанных ЛП длиной 1 м (рисунок 3.1). Геометрические параметры проводников структуры: ширина проводника $w = 185$ мкм, толщина проводника $t = 36$ мкм, расстояние от торца проводника до торца диэлектрика $d = 555$ мкм, расстояние между проводниками $s = 185$ мкм, расстояние от проводников до опорного слоя $h = 200$ мкм, относительные диэлектрические проницаемости $\epsilon_{r1} = 4$, $\epsilon_{r2} = 30$. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод для случая двух проводников.

Импульсная помеха подавалась между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником, функцию резервных трасс выполняют пассивные проводники (рисунок 3.2). На рисунке 3.2 приведены формы напряжения на ближнем и дальнем концах трехпроводной структуры при крайнем и среднем активных проводниках. Максимальные выходные амплитуды импульсов 0,5 и 0,58 В при крайнем и среднем активных проводниках, соответственно. Задержки мод по отклику 6,85, 7,7, 8,8 нс при крайнем и 6,85, 8,8 нс при среднем активных проводниках. Таким образом, при среднем активном проводнике амплитуда импульсов на 16% больше, чем при крайнем, но средний импульс, в силу симметрии воздействия, отсутствует, что удваивает максимальную длительность разлагаемого импульса.

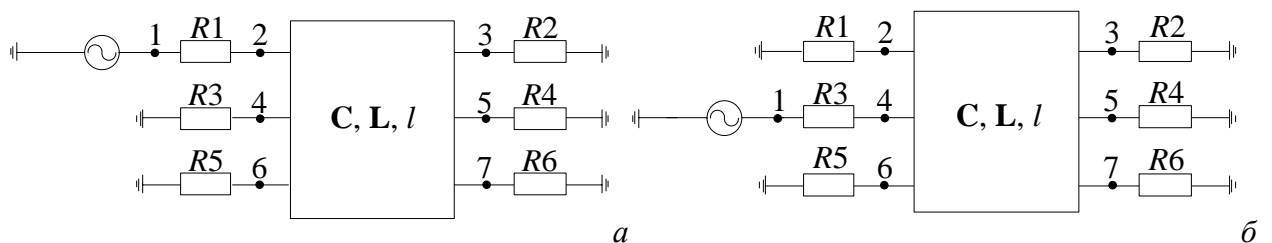


Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема структуры с двукратным МР при крайнем (а) и среднем (б) активных проводниках

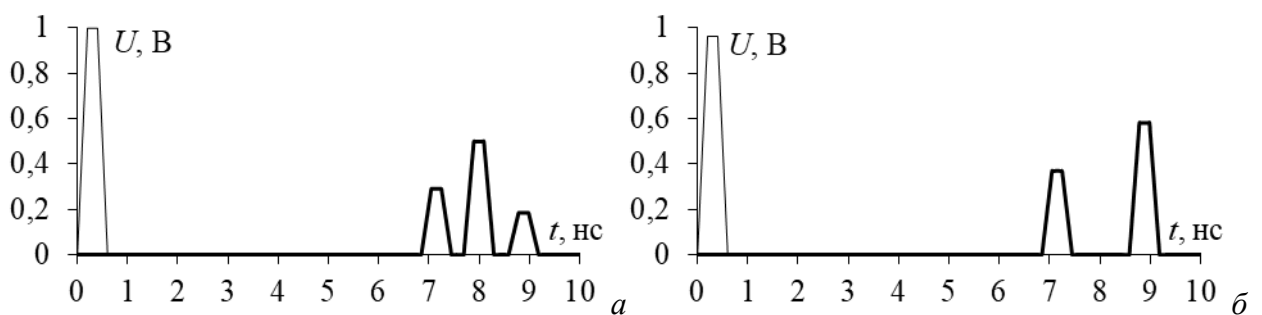


Рисунок 3.3 – Формы напряжения в начале (—) и конце (---) активного проводника при крайнем (а) и среднем (б) активных проводниках

На рисунке 3.4 представлены формы напряжений на дальнем конце резервируемой цепи для случая при крайнем и среднем активных проводниках в трехпроводной структуре в сравнении с двухпроводной с такими же геометрическими и электрофизическими параметрами. Амплитуды импульсов разложения на дальнем конце резервируемой цепи для двухпроводной структуры равны по 0,49 В, что на 0,01 и 0,9 В меньше, чем при крайнем и среднем активных проводниках, соответственно. Задержки мод по отклику для двухпроводной структуры 6,88 и 8,22 нс, что меньше, чем в предлагаемом способе.

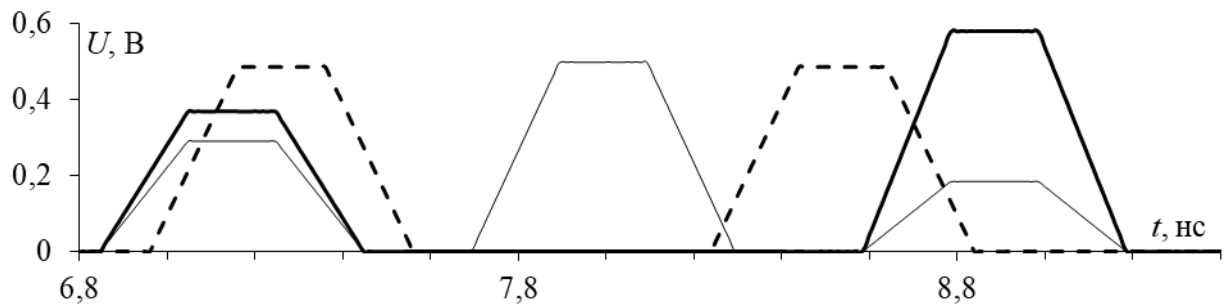


Рисунок 3.4 – Формы напряжения в конце активного проводника

при крайнем (---) и среднем (—) активных проводниках в сравнении с двухпроводной структурой (· · ·)

Таким образом, результаты моделирования показывают, что предлагаемый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием позволяет повысить надежность, за счет увеличения кратности резервирования, и помехозащищенность, за счёт увеличения длительности импульса помехи, который будет разлагаться полностью.

3.2 Исследование порядка переключения после отказов для трехпроводной структуры с модальным резервированием

Рассмотрена структура с двукратным МР описанная выше [114, 115]. Её поперечное сечение представлено на рисунке 3.1. Параметры для моделирования: $w=185$ мкм, $t=36$ мкм, $d=555$ мкм, $s=185$ мкм, $h=200$ мкм, $\epsilon_{r1}=4$, $\epsilon_{r2}=30$.

Эквивалентные схемы для моделирования трехпроводной структуры длиной $l=1$ м приведены на рисунке 3.2. При отказе резервируемой цепи типа КЗ или ХХ полагается, что резервная цепь берет на себя функции резервируемой. При моделировании номиналы резисторов для активного проводника, $R1$ и $R2$, а также $R3$ и $R4$, на рисунке 3.2 выбраны равными 50 Ом. Номиналы резисторов для пассивных проводников приняты равными 50 Ом, а для различных вариантов отказа – 1 МОм (ХХ) и 1 мкОм (КЗ).

Варианты переключения после отказов приведены на рисунке 3.5. При среднем активном проводнике вариант выбора после отказов только один, а при крайнем – два.

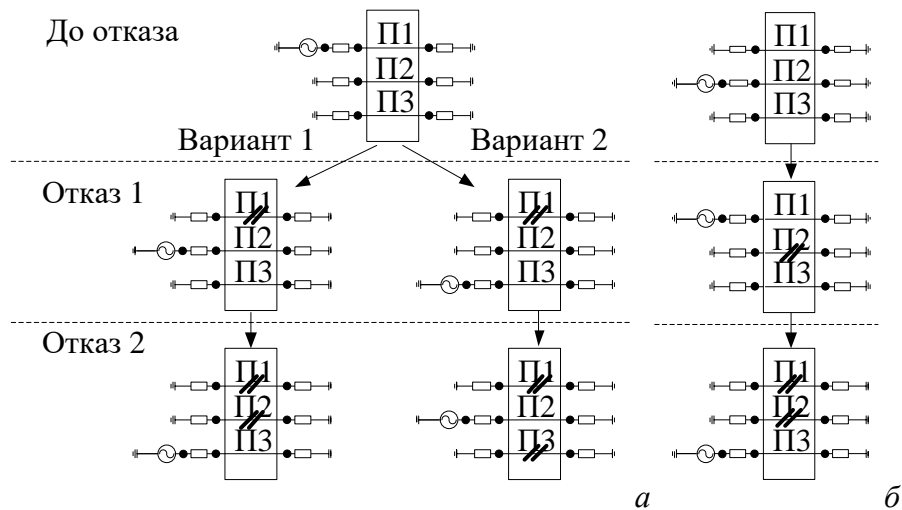


Рисунок 3.5 – Варианты выбора активного проводника после отказов на одном из концов структуры с МР при крайнем (а) и среднем (б) активных проводниках

На вход исследуемой структуры подается СШП импульс с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 200 пс. Для цепи в рабочем состоянии (номиналы резисторов всех пассивных проводников 50 Ом) на рисунке 3.6а приведены формы напряжения на ближнем конце трехпроводной структуры при крайнем и среднем активных проводниках, а на рисунке 3.6б – на дальнем. Максимальные амплитуды напряжений импульсов равны 0,499 В и 0,581 В. Задержки мод по отклику равны 6,85, 7,7 и 8,8 нс при крайнем и 6,85 и 8,8 нс при среднем активных проводниках.

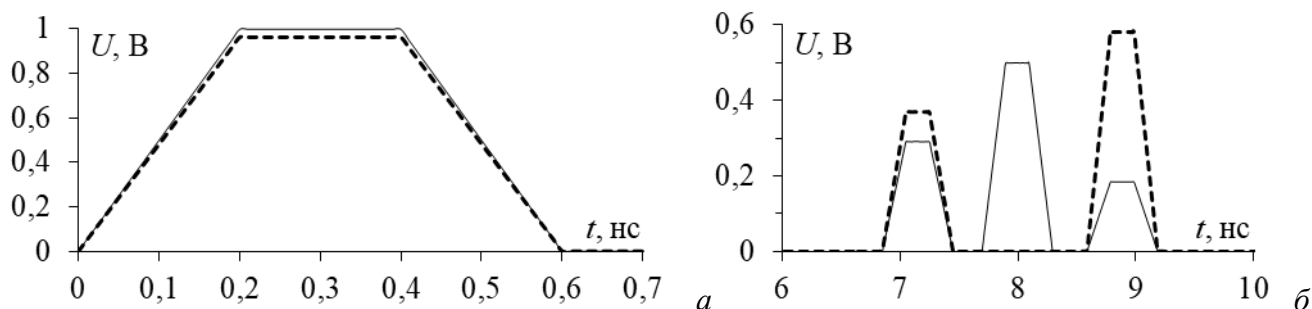


Рисунок 3.6 – Формы напряжения на ближнем (а) и дальнем (б) концах трехпроводной структуры при крайнем (—) и среднем (---) активных проводниках

На рисунках 3.7 и 3.8 приведены формы напряжения на дальнем конце активного проводника при отказе компонента одного типа на одном из концов пассивного проводника. Для ХХ (рисунок 3.7) амплитуды напряжения меньше, чем в рабочем состоянии, а для КЗ (рисунок 3.8) – либо равны, либо больше, чем в рабочем состоянии.

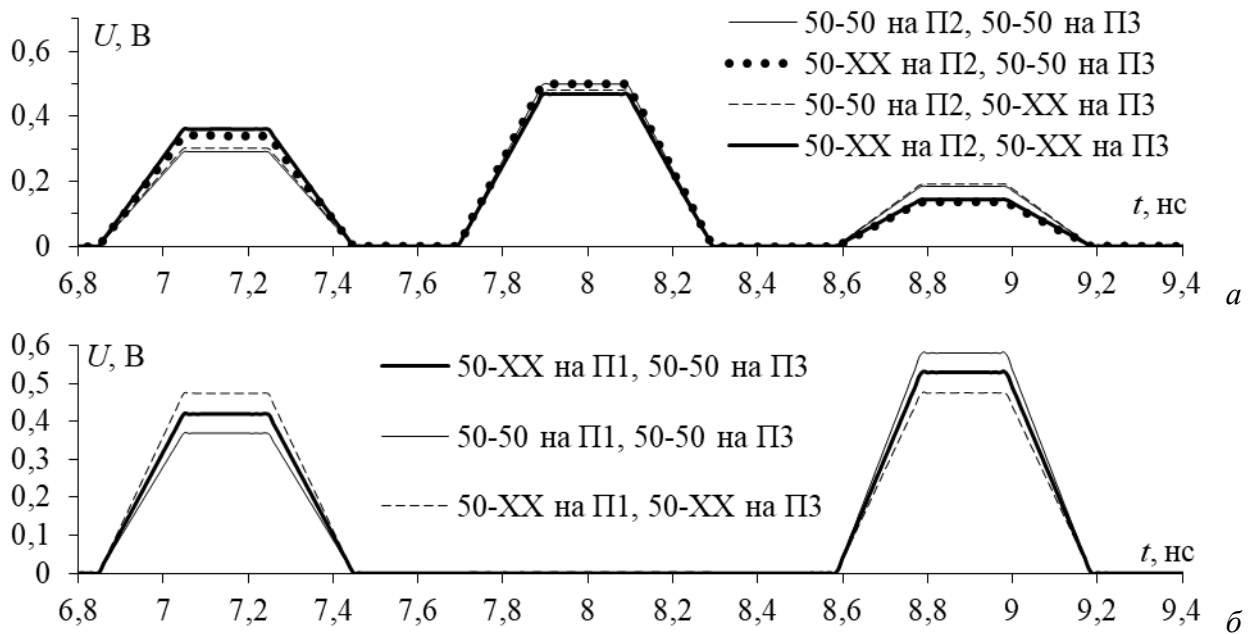


Рисунок 3.7 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника при XX на одном из концов пассивного проводника при активных проводниках П1 (а) и П2 (б)

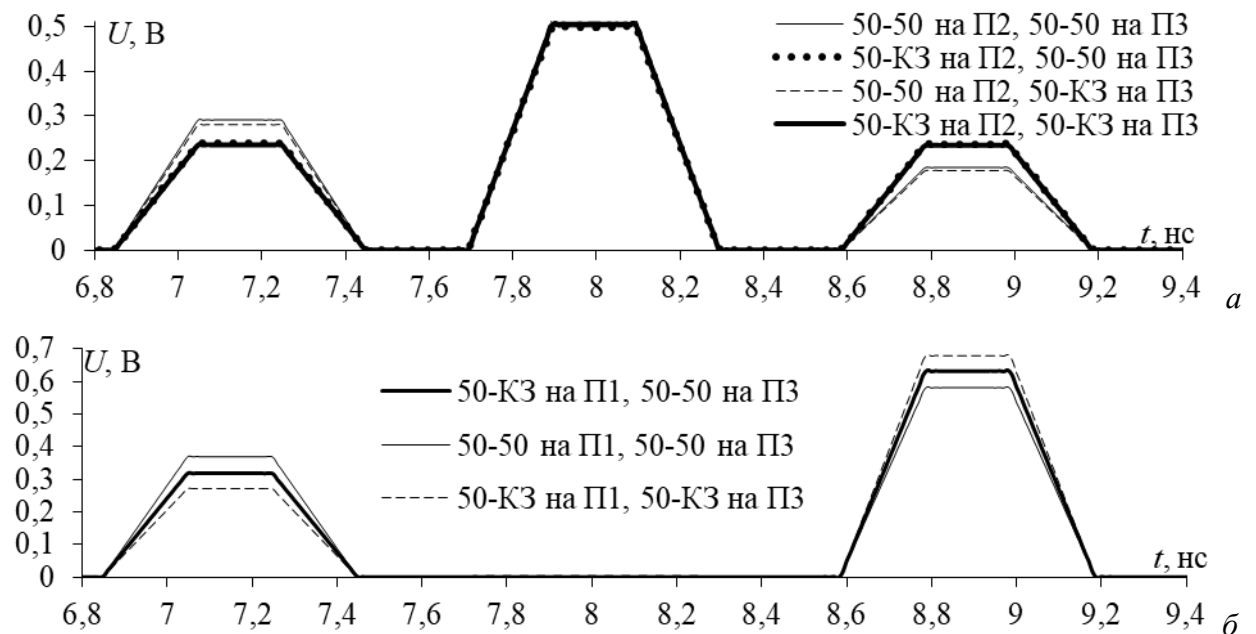


Рисунок 3.8 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника при K3 на одном из концов пассивного проводника при активных проводниках П1 (а) и П2 (б)

На рисунках 3.9 и 3.10 приведены аналогичные результаты при отказе компонента разных типов. Для случая при крайнем активном проводнике (рисунок 3.9) амплитуды напряжения больше, чем в рабочем состоянии, а при среднем (рисунок 3.10) – либо равны, либо больше, чем в рабочем состоянии.

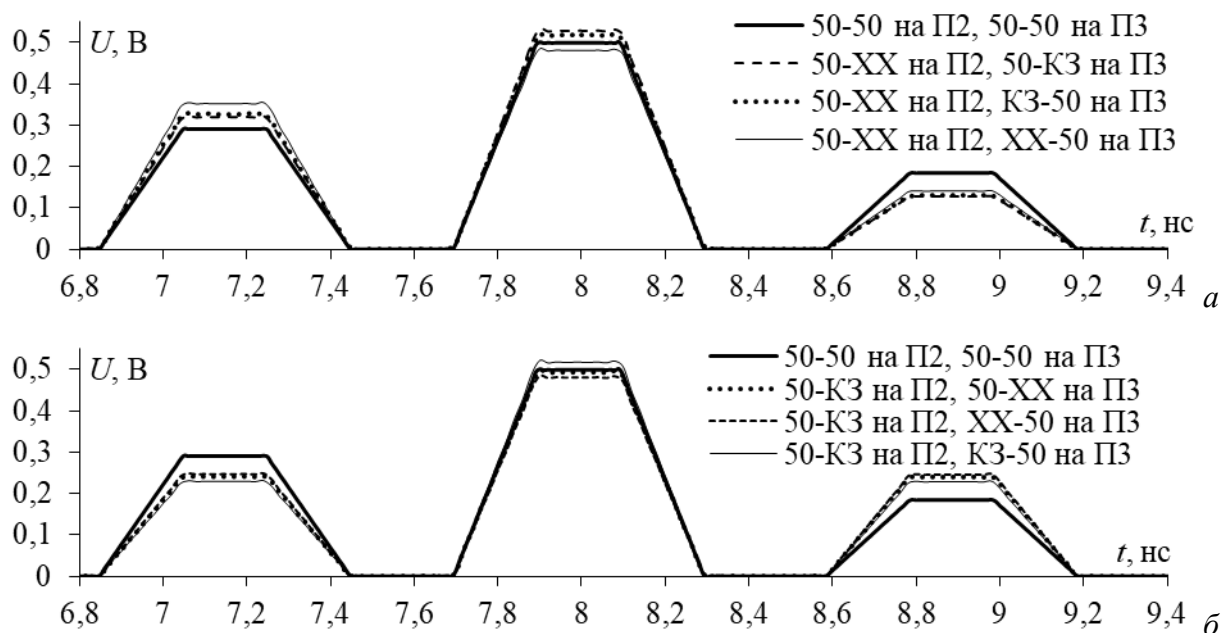


Рисунок 3.9 – Формы напряжения дальнем конце активного проводника П1

при XX (а) и КЗ (б) на конце пассивного проводника П2 при различных граничных условиях на П3

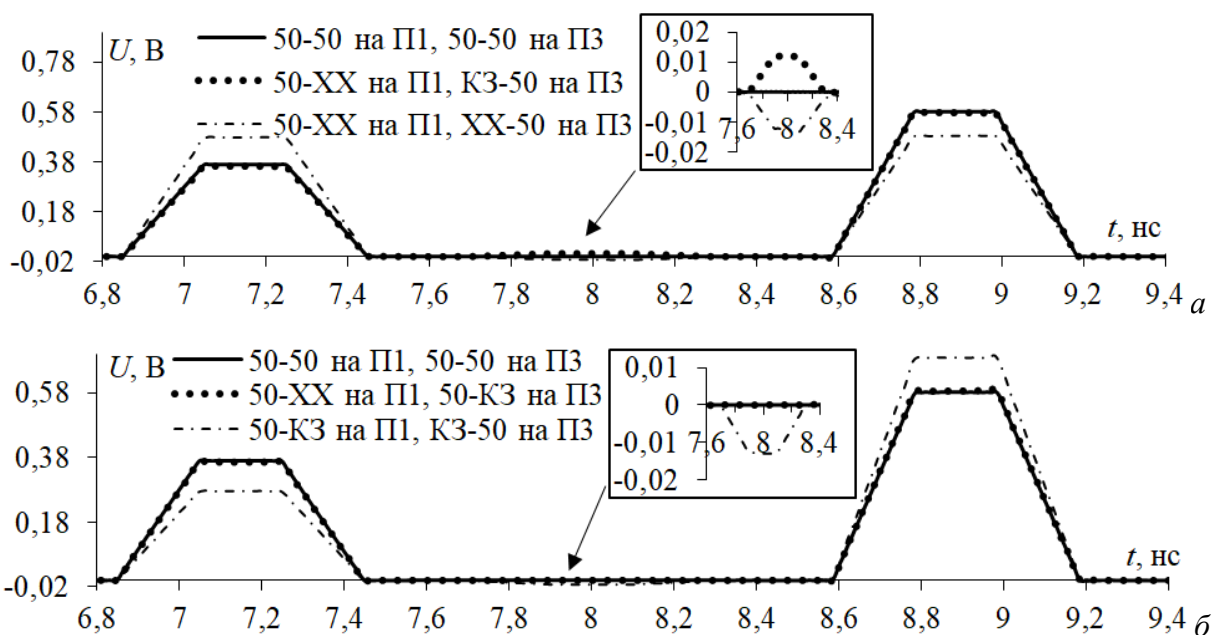


Рисунок 3.10 – Формы напряжения дальнем конце активного проводника П2

при XX (а) и КЗ (б) на конце пассивного проводника П1 при различных граничных условиях на П3

Отметим, что на рисунках 3.7–3.10 рассмотрены только те формы напряжения, которые не идентичны при различных вариантах отказов. Так, например, формы напряжения при активном проводнике П1 или П3 идентичны. Также формы напряжения идентичны, если граничные условия на пассивных проводниках при различных вариантах отказа симметричны. Так, форма напряжения варианта 50-50 на П2, 50-КЗ на П3 идентична 50-50 на П2, КЗ-50 на П3 и т.д.

Амплитуды напряжения на дальнем конце активного проводника до и после различных вариантов переключения после отказов сведены в таблицу 3.1. При крайнем активном проводнике до отказов:

– для варианта 1 после отказов наблюдается уменьшение максимального напряжения до 0,469 В и увеличение – до 0,63 В;

– для варианта 2 после отказов наблюдается уменьшение максимального напряжения на 0,47 В и увеличение – до 0,688 В.

Для варианта переключения при среднем активном проводнике до отказов: после отказов наблюдается уменьшение максимального напряжения до 0,469 В и увеличение – до 0,58 В. Из результатов следует, что если неизвестен тип отказа, то оптимален вариант переключения при среднем активном проводнике до отказов, так как в таком случае максимальная амплитуда меньше вне зависимости от варианта отказов.

Однако если известно, что в определённых условиях эксплуатации возможен только отказ типа ХХ или КЗ, то оптимальный вариант переключения может быть другим. При крайнем активном проводнике до отказов, для варианта 1 после отказов ХХ или КЗ наблюдается уменьшение максимального напряжения до 0,469 В и увеличение – до 0,53 В или уменьшение максимального напряжения до 0,49 В и увеличение – до 0,63 В. Для варианта 2 после отказов ХХ или КЗ наблюдается уменьшение максимального напряжения до 0,47 В и увеличение – до 0,499 В или уменьшение максимального напряжения до 0,499 В и увеличение – до 0,688 В. Для варианта переключения при среднем активном проводнике до отказов после отказов ХХ или КЗ наблюдается уменьшение максимального напряжения до 0,469 В и увеличение – до 0,58 В или уменьшение максимального напряжения до 0,49 В и увеличение – до 0,58 В. Таким образом, если возможен отказ только типа ХХ или КЗ, то оптимальный вариант переключения после отказов типа КЗ – при среднем активном проводнике до отказов, а после отказов типа ХХ – вариант 2 при крайнем активном проводнике до отказов, так как после отказов в этом случае максимальное значение напряжения меньше.

Таким образом, рассмотрен отказ элементов системы с двукратным МР. Полагалось, что цепь в рабочем состоянии, если граничные условия на концах проводников примерно соответствуют 50 Ом, а при отказе одного компонента системы, на одном из концов цепи образуется КЗ или ХХ. После переключения максимальная амплитуда на дальнем конце активного проводника изменяется. Показано, что, если не известно, вероятность какого типа отказа больше, то предпочтителен вариант переключения при среднем активном проводнике до отказов, так как при всех вариантах отказов максимальная амплитуда меньше и равна 0,58 В. Если возможен отказ только типа ХХ или КЗ, то предпочтителен вариант переключения после отказов типа КЗ при среднем активном проводнике до отказов, а после отказов типа ХХ –

вариант 2 при крайнем активном проводнике до отказов, так как после отказов максимальные амплитуды меньше и равны 0,58 и 0,499 В, соответственно.

Таблица 3.1 – Амплитуды напряжения после различных вариантов отказов на одном из концов структуры с МР

Активный проводник в структуре без отказов	$U_{\text{макс}}, \text{В}$	Вариант	После отказа 1	$U_{\text{макс}}, \text{В}$	После отказа 2	$U_{\text{макс}}, \text{В}$
Крайний	0,499	1	50–XX на П1, 50–50 на П3	0,53	50–XX на П1, 50–XX на П2	0,469
					50–XX на П1, XX–50 на П2	0,48
					50–XX на П1, 50–К3 на П2	0,49
					50–XX на П1, К3–50 на П2	0,48
			50–К3 на П1, 50–50 на П3	0,63	50–К3 на П1, 50–К3 на П2	0,49
					50–К3 на П1, К3–50 на П2	0,52
					50–К3 на П1, 50–XX на П2	0,53
					50–К3 на П1, XX–50 на П2	0,517
		2	50–XX на П1, 50–50 на П2	0,48	50–XX на П1, 50–XX на П3	0,47
					50–XX на П1, XX–50 на П3	0,484
					50–XX на П1, 50–К3 на П3	0,585
					50–XX на П1, К3–50 на П3	0,58
			50–К3 на П1, 50–50 на П2	0,499	50–К3 на П1, К3–50 на П3	0,679
					50–К3 на П1, 50–К3 на П3	0,688
					50–К3 на П1, 50–XX на П3	0,585
					50–К3 на П1, XX–50 на П3	0,58
Средний	0,58	-	50–XX на П2, 50–50 на П3	0,499	50–XX на П1, 50–XX на П2	0,469
					50–XX на П1, XX–50 на П2	0,48
					50–XX на П1, 50–К3 на П2	0,49
					50–XX на П1, К3–50 на П2	0,48
			50–К3 на П2, 50–50 на П3	0,499	50–К3 на П1, 50–К3 на П2	0,49
					50–К3 на П1, К3–50 на П2	0,52
					50–К3 на П1, 50–XX на П2	0,53
					50–К3 на П1, XX–50 на П2	0,517

3.3 Основные результаты раздела

1. Предложен способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием. Он позволяет повысить отказоустойчивость, за счет увеличения кратности резервирования, и помехозащищенность, за счёт увеличения длительности импульса помехи, который будет разлагаться полностью.

2. Рассмотрен отказ элементов системы с двукратным МР. Полагалось, что цепь в рабочем состоянии, если граничные условия на концах проводников примерно соответствуют 50 Ом, а при отказе одного компонента системы, на одном из концов цепи образуется КЗ или ХХ. После переключения максимальная амплитуда на дальнем конце активного проводника

изменяется. Показано, что, если не известно, вероятность какого типа отказа больше, то предпочтителен вариант переключения при среднем активном проводнике до отказов, так как при всех вариантах отказов максимальная амплитуда меньше и равна 0,58 В. Если возможен отказ только типа XX или КЗ, то предпочтителен вариант переключения после отказов типа КЗ при среднем активном проводнике до отказов, а после отказов типа XX – вариант 2 при крайнем активном проводнике до отказов, так как после отказов максимальные амплитуды меньше и равны 0,58 и 0,499 В, соответственно.

4. ТРЕХКРАТНОЕ МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

4.1 Предварительный анализ структур с трехкратным модальным резервированием с учетом отказов их элементов

Здесь представлен предварительный анализ структур с трехкратным МР с учетом отказов на концах и вдоль проводников. Сначала приводятся геометрические и схемные модели, которые учитывают различные варианты отказов на концах и вдоль проводников исследуемых структур. Далее приводится схема вариантов выбора активного проводника после отказов структуры с трехкратным МР и ее эквивалентный вариант. Далее приводятся одновариантный и многовариантный анализы структуры с исполнением проводников сверху и снизу. На основе этих исследований ставятся цели дальнейших моделирований и экспериментальных исследований. Представленные исследования опубликованы в работах [116–122].

4.1.1 Геометрические и схемные модели структур с трехкратным модальным резервированием до и после отказов

На рисунке 4.1 представлены поперечные сечения структур с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в центре, сверху и снизу и в виде боковых полигонов. Особенность этих структур заключается в симметричном расположении проводников. Поэтому, активным проводником в таких структурах до отказов может быть любой из четырех, а характеристики не будут отличаться друг от друга.

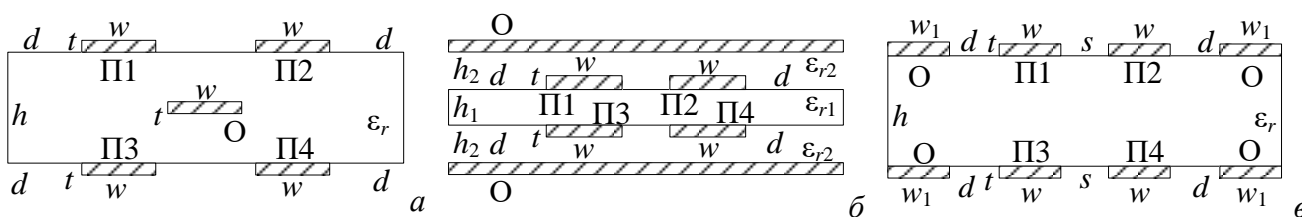


Рисунок 4.1 – Геометрические модели поперечных сечений структур с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в центре (а), сверху и снизу (б), в виде боковых полигонов (в)

На рисунке 4.2 представлена эквивалентная схема с учетом устройства переключения (УП) и без него. После отказа оно переключает источник сигнала на резервный проводник.

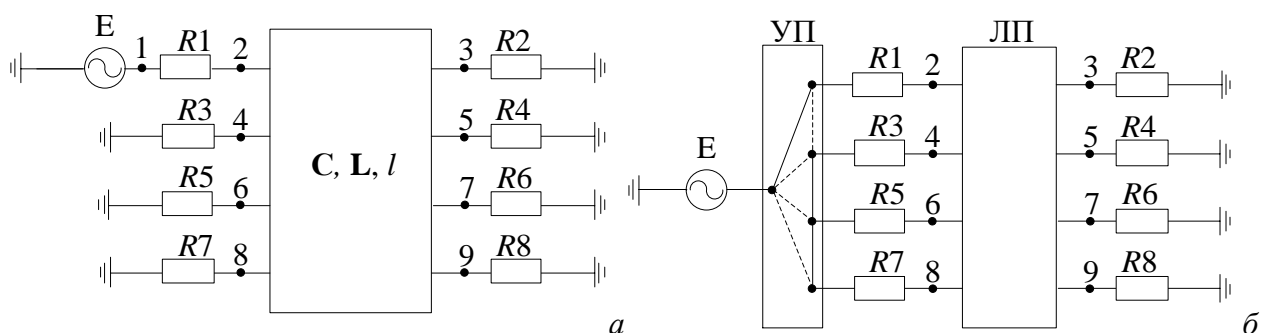


Рисунок 4.2 – Эквивалентные схемы рассматриваемых структур без (а) и с (б) УП

Далее представлены схемные модели, имитирующие реальные отказы на концах проводников (отказы их элементов) и вдоль проводников цепей с трехкратным МР, которые разработаны на основе обзора в пункте 1.1.1. Схемные модели, имитирующие отказы (КЗ, ХХ и их вариации) в начале и конце проводников, представлены на рисунке 4.3. При отказе вдоль проводника в произвольном месте структура длиной l делится на два участка с длинами l_1 и l_2 . Схемные модели, имитирующие такие отказы, представлены на рисунках 4.4 и 4.5.

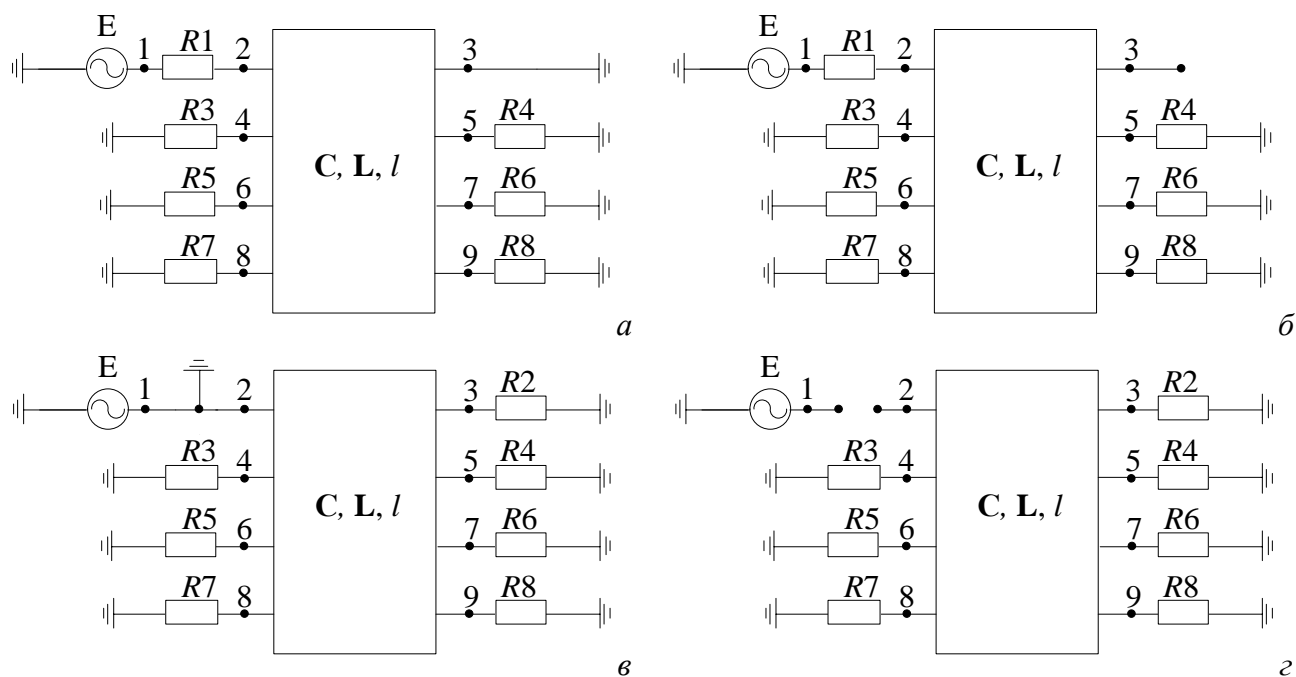


Рисунок 4.3 – Схемные модели имитирующие, КЗ на выходе (а), обрыв на выходе (б), КЗ на входе (в), обрыв на входе (г)

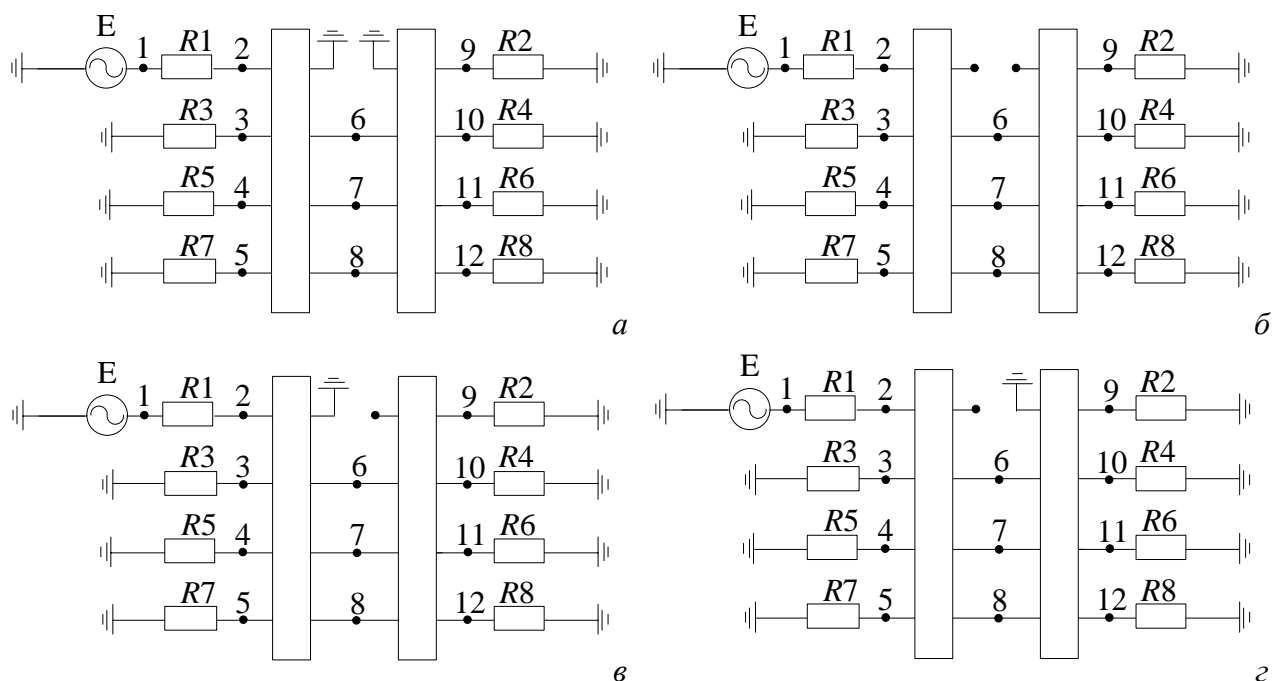


Рисунок 4.4 – Схемные модели имитирующие обрыв проводника с замыканием концов на землю (а), обрыв проводника (б), обрыв проводника с замыканием левого конца на землю (в), обрыв проводника с замыканием правого конца на землю (г)

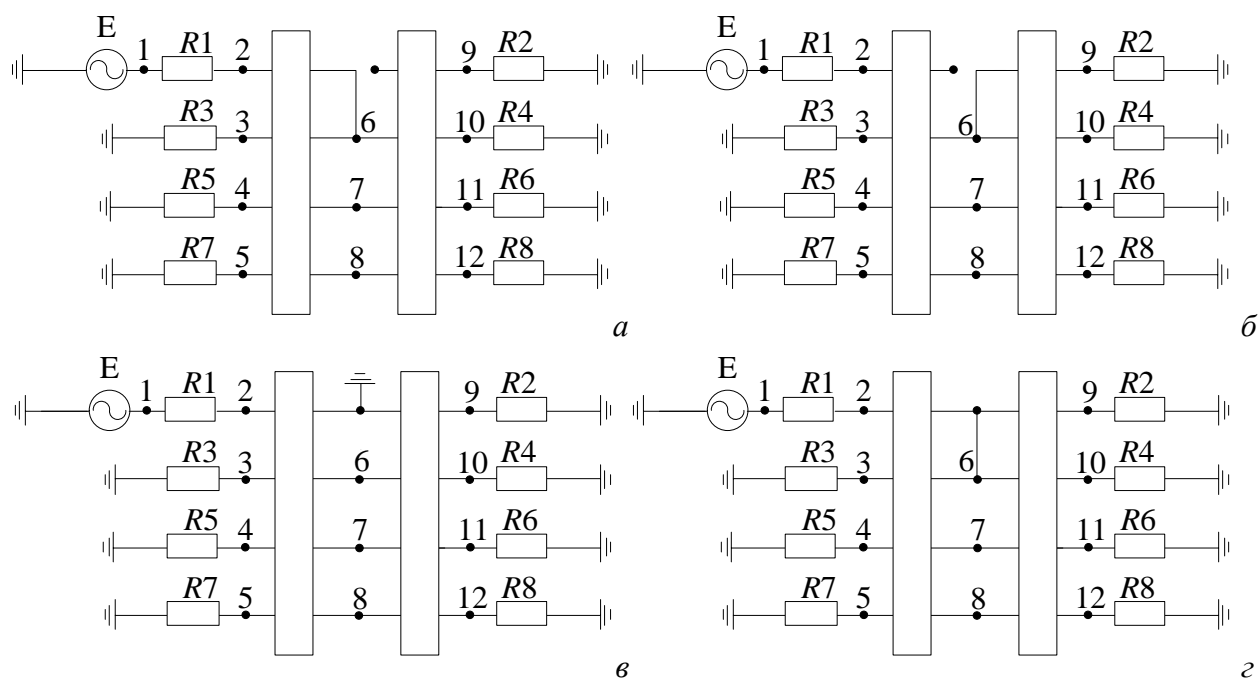


Рисунок 4.5 – Схемные модели: обрыв проводника с замыканием левого конца на соседний проводник (а), обрыв проводника с замыканием правого конца на соседний проводник (б), КЗ на землю (в), замыкание соседних проводников (г)

На рисунке 4.6 представлена эквивалентная схема структуры с трехкратным МР до и после отказов с учетом УП на основе переключателей Т-типа [123]. Полагается, что отказы компонента с нагрузкой R могут быть либо в виде обрыва (XX), либо короткого замыкания на

землю (КЗ). Например, до отказов работает проводник 1, а проводники 2–4 – резервные (рисунок 4.6а). После отказа на одном из концов активного проводника можно переключиться на один из пассивных. После отказа на конце проводника 1, УП переключает источник на проводник 2 (рисунок 4.6б), а проводники 3 и 4 остаются резервными. После отказа 2 на ближнем конце проводника 2, УП переключает источник на проводник 3 (рисунок 4.6в). После отказа 3 остается только один вариант переключения (рисунок 4.6г).

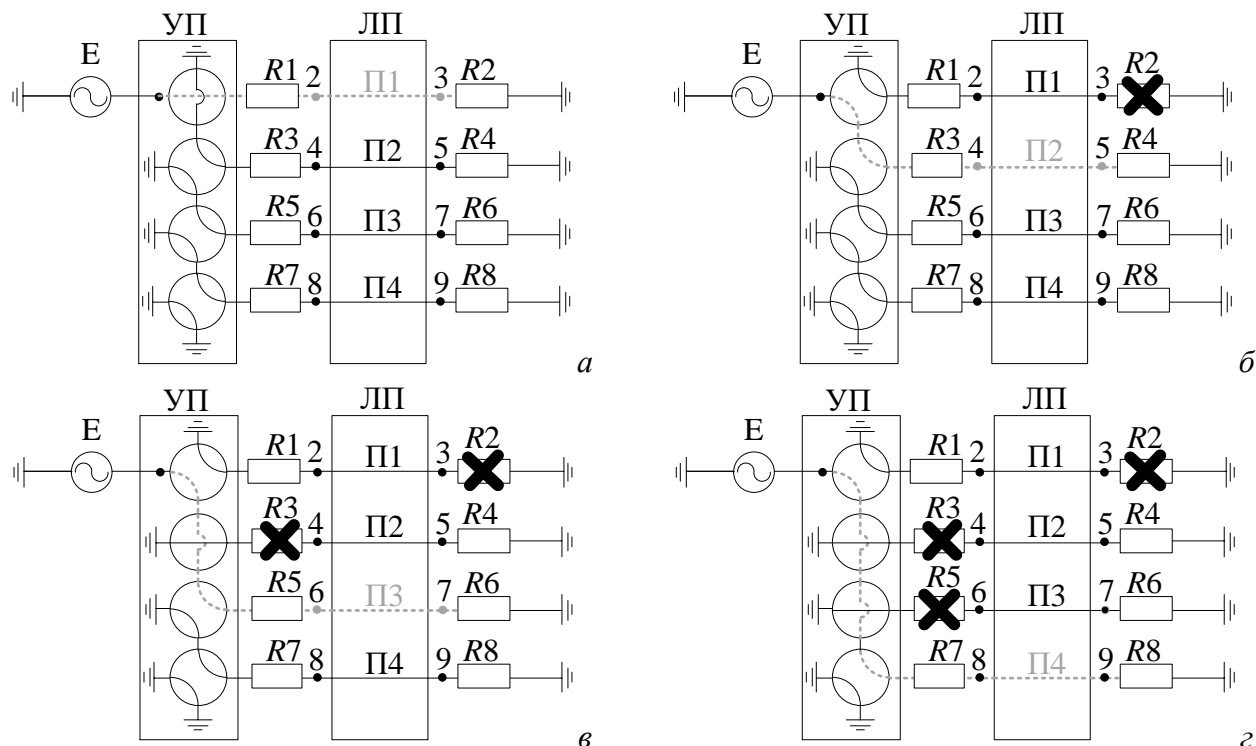


Рисунок 4.6 – Эквивалентные схемы структуры с трехкратным МР до (а) и после отказов 1 (б), 2 (в) и 3 (г)

На рисунке 4.7 показаны все возможные варианты выбора активного проводника после последовательных отказов на одном из концов структуры с трехкратным МР. Представлены 6 вариантов выбора порядка переключения (6 вертикальных направлений, рисунок 4.7). После отказа 1 возможно переключение на любой из трех свободных проводников. При этом, вариант переключения определяет поведение выходных характеристик (амплитуды импульсов разложения U_i). Так, после отказа 1 появляются 3 варианта переключения. После отказа 2, для каждого из трех вариантов остаются 2 варианта переключения, а после отказа 3 можно переключиться лишь на последний оставшийся проводник (рисунок 4.7). Для примера, представленный выше порядок переключения, который соответствует варианту 1 после отказов (рисунок 4.6, крайний «путь» слева): после отказа 1 на одном из концов активного проводника П1 УП переключает на проводник П2 и выходные характеристики изменятся; после отказа 2 возможно переключение либо на П3 (вариант 1.1) либо на П4 (вариант 1.2). Однако из рисунка 4.1 следует, что характеристики для этих вариантов будут одинаковы (поскольку

2 оставшихся проводника расположены на одном проводящем слое структуры). После отказа 3 для вариантов 1.1 и 1.2 возможно переключиться либо на П4, либо на П3, соответственно, но выходные характеристики в данном случае также будут одинаковы.

Таким образом, 6 вариантов порядка переключения можно представить в виде 3 вариантов, а отказ 3 не влияет на порядок переключения в случае симметричных структур. На рисунке 4.8 представлена эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника для симметричных структур с трехкратным МР. Данная эквивалентная схема нужна для упрощения моделирования и экспериментальных исследований. Из рисунка 4.8 видно, что активным проводником в каждом случае (до и после отказов) является П1, а каждый отказавший проводник был активным проводником до отказа, что также справедливо для всех симметричных структур. Таким образом, эквивалентная схема, представленная на рисунке 4.8, справедлива для всех симметричных структур с трехкратным МР.

До отказов

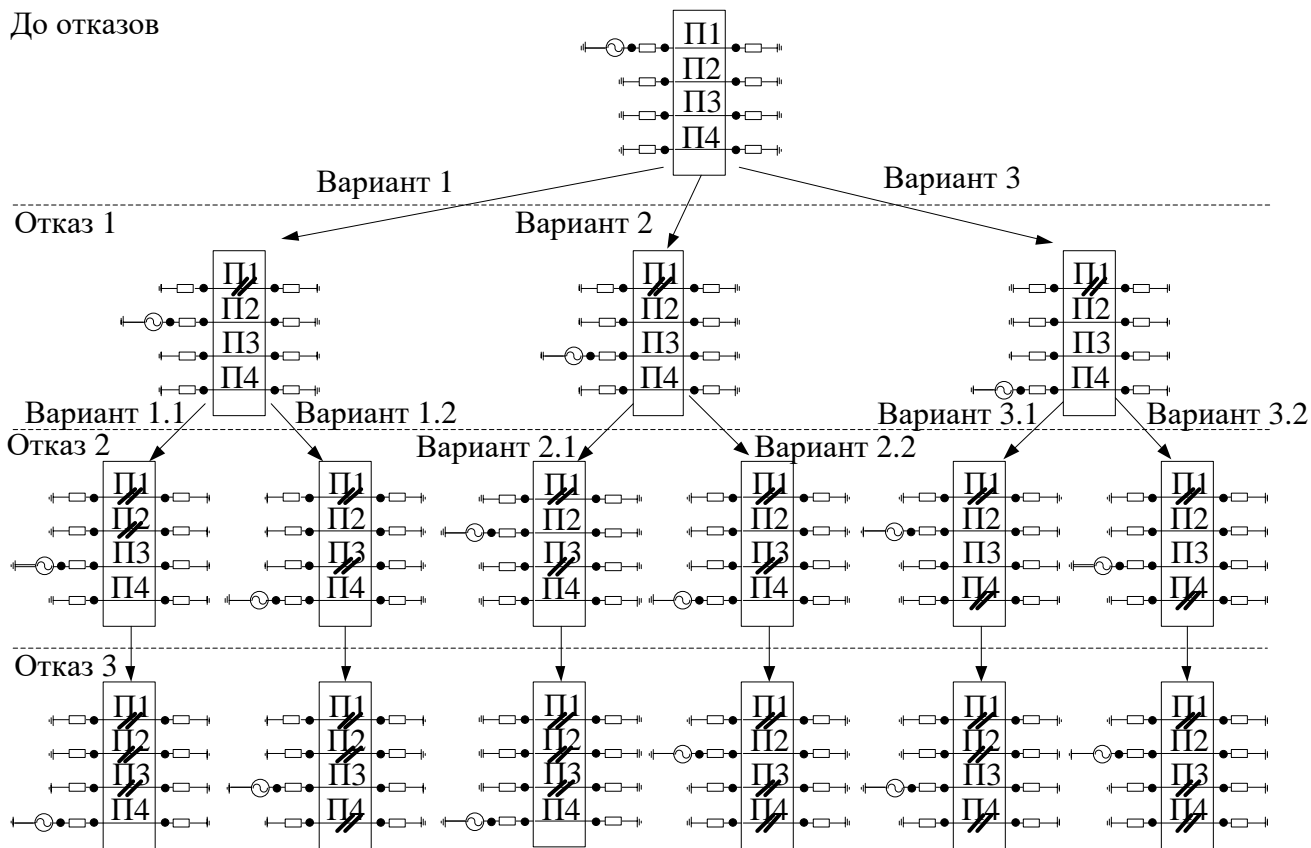


Рисунок 4.7 – Схема вариантов выбора активного проводника после отказов структуры с трехкратным МР.

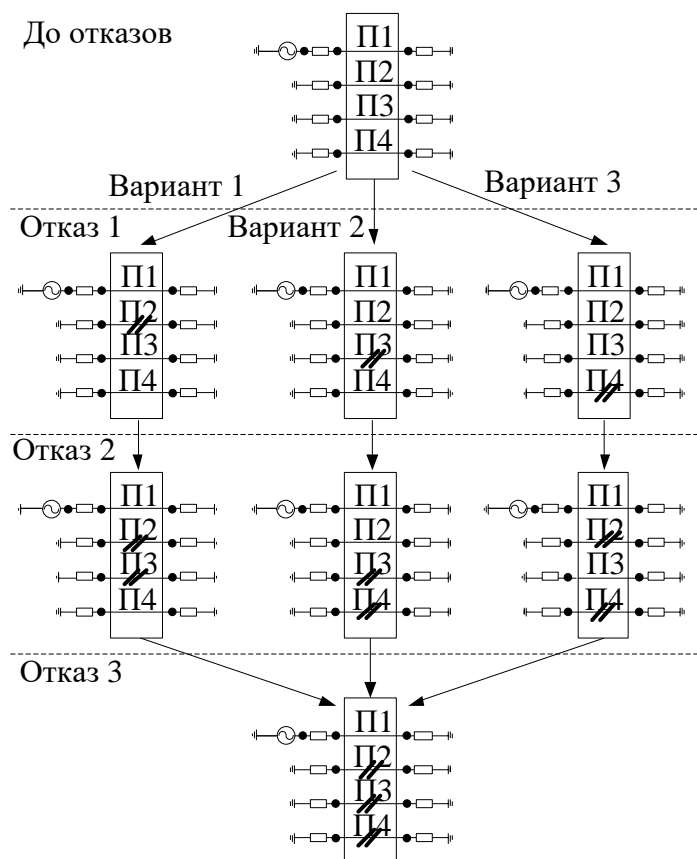


Рисунок 4.8 – Эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР

4.1.2 Одновариантный анализ структуры

Здесь приводится одновариантный анализ структуры с исполнением опорных проводников сверху и снизу с учетом отказов на концах проводников (схемные модели представлены на рисунке 4.3).

Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу представлено на рисунке 4.1б. В таблицу 4.1 сведены исходные параметры структуры. Параметры подбирались с минимально возможными значениями при производстве, а также чтобы структура была согласована с трактом 50 Ом. На ближний конец структуры длиной 0,5 м (рисунок 4.2а) подавался импульсный сигнал общей длительностью 90 пс и амплитудой ЭДС 2 В.

Таблица 4.1 – Исходные параметры структуры

Параметр	w , мм	s , мм	t , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
Значение	0,2	0,2	0,035	0,36	0,36	10,2	4,3

Результаты моделирования для структуры с исходным набором параметров после отказов 1 и 2 приведены на рисунках 4.9–4.12. Приведены только те формы напряжений, которые не идентичны при различных вариантах отказов.

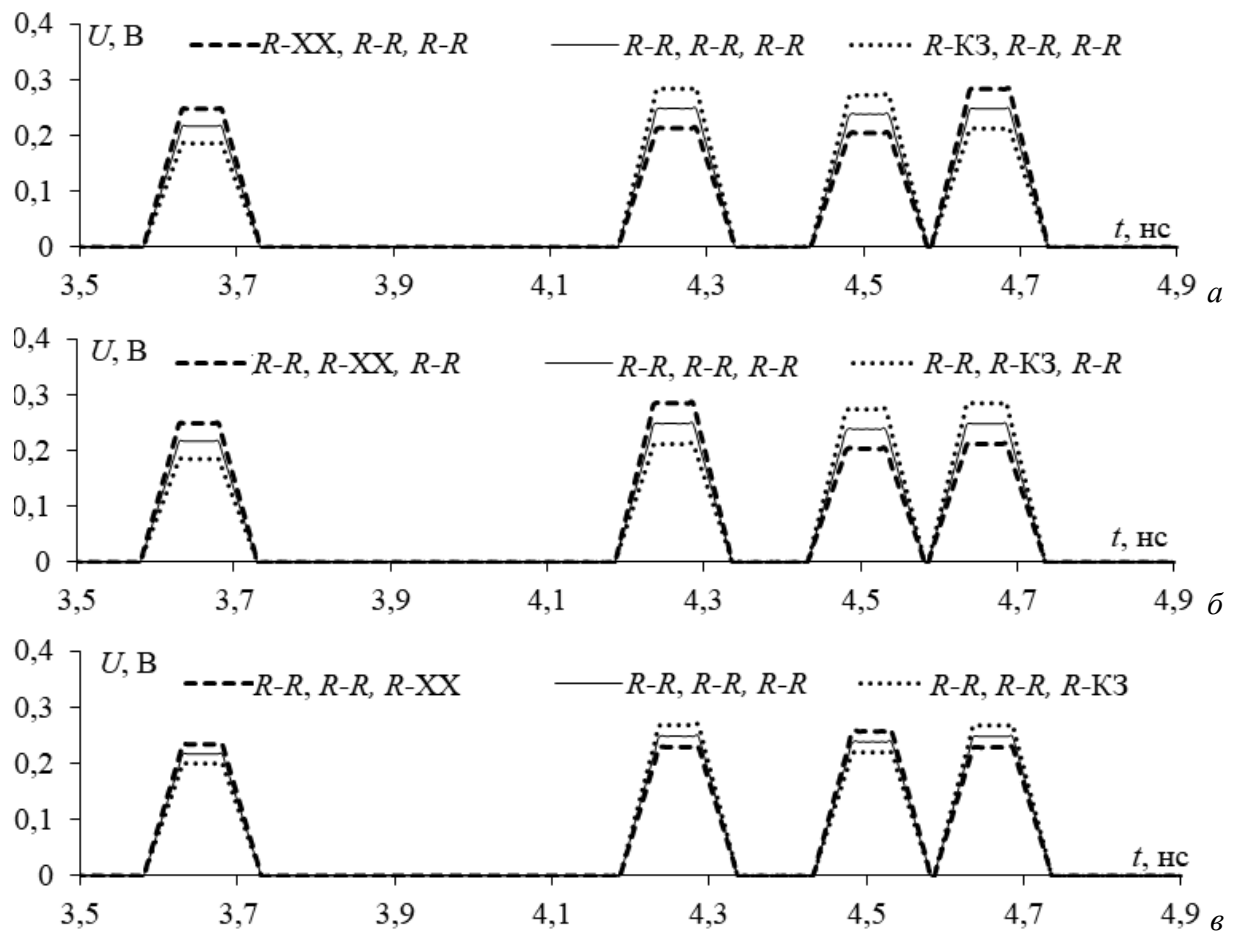


Рисунок 4.9 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника при различных граничных условиях на концах П2 (а), П3 (б), П4 (в) (после отказа 1)

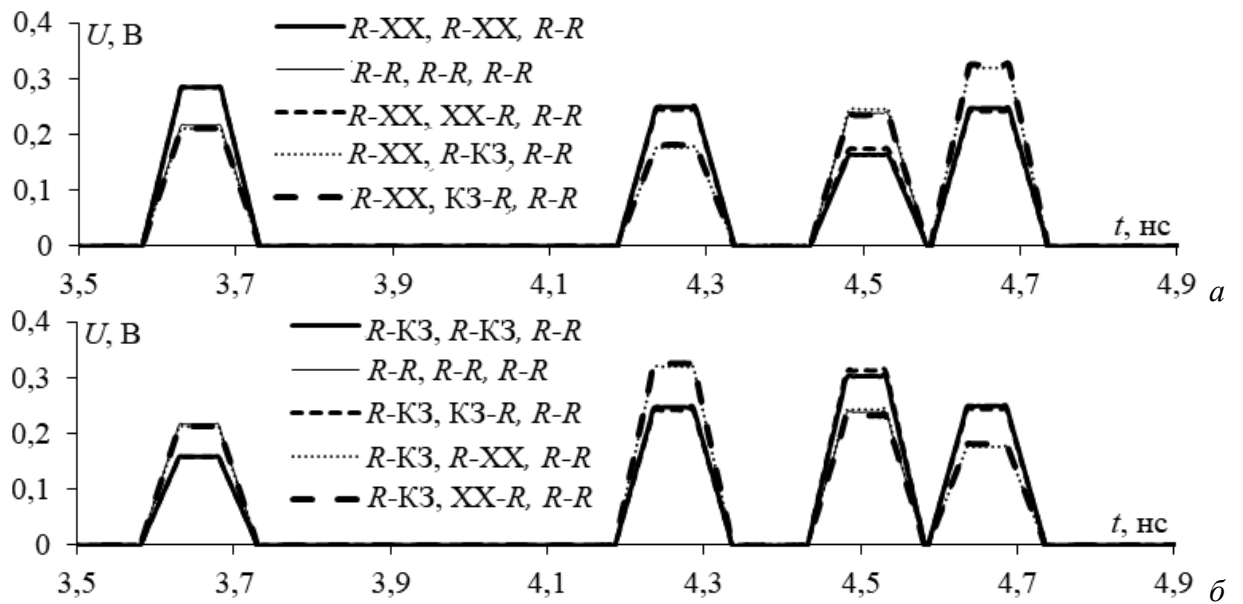


Рисунок 4.10 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника при различных граничных условиях на концах П2 при варианте 1 (после отказа 2)

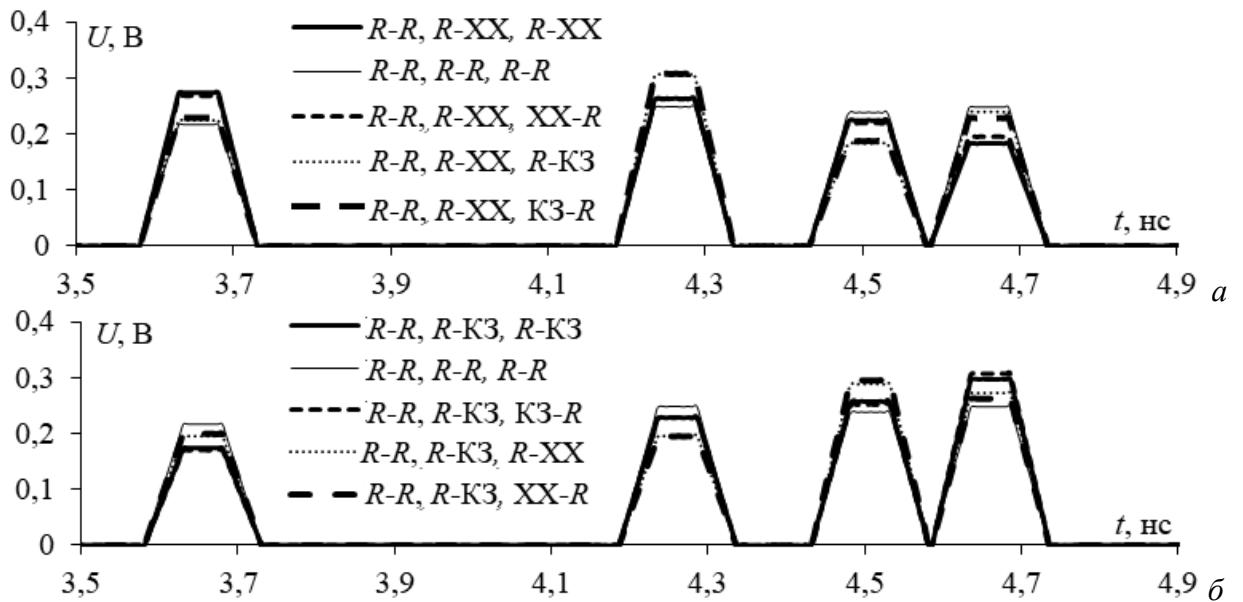


Рисунок 4.11 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника при различных граничных условиях на концах П3 при варианте 2 (после отказа 2)

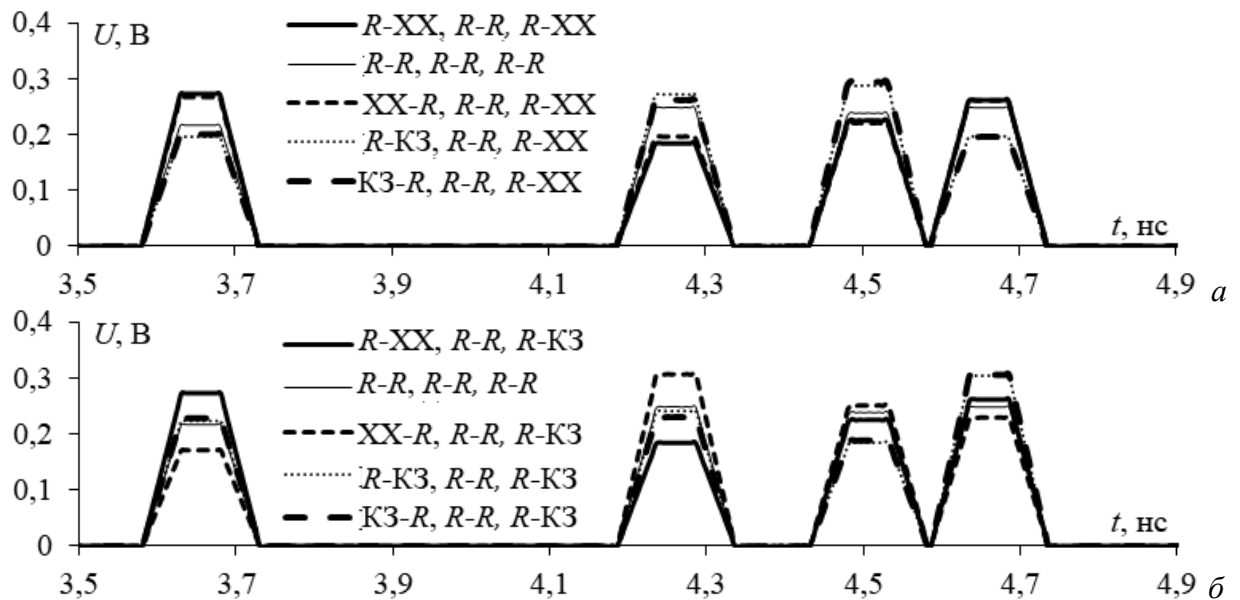


Рисунок 4.12 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника при различных граничных условиях на концах П4 при варианте 3 (после отказа 2)

Из рисунков видно, что наблюдается разложение на 4 импульса с задержками 3,58, 4,18, 4,43 и 4,58 нс. Максимальное напряжение на дальнем конце активного проводника равно 0,25 В при значениях резисторов на концах пассивных проводников 50 Ом (до отказов). После отказа 1 (рисунок 4.9) при изменении граничных условий на проводниках П2, П3 и П4 отклонения на концах активного проводника для каждого из четырех импульсов составляют $\pm 0,036$, $\pm 0,038$ и $\pm 0,021$ В, соответственно. После отказа 2 максимальные отклонения для каждого из четырех импульсов для вариантов переключения 1, 2 и 3 составляют $\pm 0,08$, $\pm 0,061$ и $\pm 0,06$ В, соответственно. Следовательно, минимальное отклонение достигается при изменении граничных условий на П4. Значения максимальных напряжений после отказов 1 и 2 сведены в таблицу 4.2.

Результаты моделирования для отказа 3 не представлены, так как в данном случае он не влияет на порядок переключения (рисунок 4.8). Все получаемые граничные условия после отказов одинаковы для всех вариантов. Значения максимальных напряжений после отказа 3 также сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Максимальные значения напряжения в конце активного проводника после различных вариантов отказов на одном из концов структуры

Вариант	После отказа 1	$U_{\text{макс}}, \text{В}$	Вариант	После отказа 2	$U_{\text{макс}}, \text{В}$	После отказа 3 (для всех вариантов)	$U_{\text{макс}}, \text{В}$
1	50-XX, 50-50, 50-50	0,284	1	R-XX, R-XX, 50-50	0,285	R-XX, R-XX, R-XX	0,322
						R-XX, XX-50, R-XX	0,313
				R-XX, XX-50, 50-50	0,284	R-XX, 50-K3, R-XX	0,307
				R-XX, 50-K3, 50-50	0,321	R-XX, K3-50, R-XX	0,302
				R-XX, K3-50, 50-50	0,326	50-K3, 50-K3, R-XX	0,317
	50-K3, 50-50, 50-50	0,286		50-K3, K3-50, R-XX	0,333		
				50-K3, 50-K3, 50-50	0,305	50-K3, K3-50, R-XX	0,309
				50-K3, K3-50, 50-50	0,315	50-K3, R-XX, R-XX	0,314
				50-K3, R-XX, 50-50	0,322	50-K3, XX-50, R-XX	0,314
				50-K3, XX-50, 50-50	0,328	R-XX, R-XX, 50-K3	0,281
2	50-50, 50-XX, 50-50	0,287	2	50-50, R-XX, R-XX	0,274	R-XX, XX-50, 50-K3	0,278
						R-XX, 50-K3, 50-K3	0,334
				50-50, R-XX, XX-50	0,268	R-XX, XX-50, 50-K3	0,278
				50-50, R-XX, 50-K3	0,308	R-XX, 50-K3, 50-K3	0,35
				50-50, R-XX, K3-50	0,309	50-K3, 50-K3, 50-K3	0,292
	50-50, 50-K3, 50-50	0,286		50-K3, K3-50, 50-K3	0,297		
				50-50, 50-K3, 50-K3	0,298	50-K3, K3-50, 50-K3	0,297
				50-50, 50-K3, K3-50	0,308	50-K3, R-XX, 50-K3	0,336
				50-50, 50-K3, R-XX	0,291	50-K3, XX-50, 50-K3	0,342
				50-50, 50-K3, XX-50	0,297	R-XX, R-XX, K3-50	0,271
3	50-50, 50-50, R-XX	0,259	3	R-XX, 50-50, R-XX	0,273	R-XX, XX-50, K3-50	0,275
						R-XX, XX-50, K3-50	0,346
				XX-50, 50-50, R-XX	0,267	R-XX, K3-50, K3-50	0,341
				50-K3, 50-50, R-XX	0,290	50-K3, 50-K3, K3-50	0,281
				K3-50, 50-50, R-XX	0,296	50-K3, XX-50, K3-50	0,352
	50-50, 50-50, 50-K3	0,269		50-K3, 50-50, 50-K3	0,298		
				50-K3, 50-50, 50-K3	0,298	R-XX, R-XX, XX-50	0,307
				K3-50, 50-50, 50-K3	0,308	R-XX, XX-50, XX-50	0,313
				R-XX, 50-50, 50-K3	0,305	R-XX, 50-K3, XX-50	0,296
				XX-50, 50-50, 50-K3	0,306	R-XX, K3-50, XX-50	0,313
						50-K3, 50-K3, XX-50	0,329
						50-K3, K3-50, XX-50	0,333
						50-K3, R-XX, XX-50	0,297
						50-K3, XX-50, XX-50	0,303

На рисунке 4.13 для вариантов переключения 1, 2 и 3 представлены зависимости значений $U_{\text{макс}}$ из таблицы 4.2 от номера отказа для данной структуры.

Из таблицы видно, что для вариантов 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение максимального напряжения до 0,286, 0,287 и 0,269 В (значения от 1 до 2 из рисунка 4.13), соответственно, а после отказа 2 – до 0,328, 0,309 и 0,308 В (значения от 2 до 3 из рисунка 4.13), соответственно. После отказа 3 наблюдается изменение максимального напряжения до 0,352 В (значения от 3 из рисунка 4.13), но он не влияет на порядок переключения. Таким образом, для данной структуры оптимален вариант 3, так как значения максимального напряжения после

отказов 1 и 2 минимальные из всех вариантов и равны 0,269 и 0,308 В (нижняя сплошная линия из рисунка 4.13), а это на 3,2 и 3,1% меньше других вариантов.

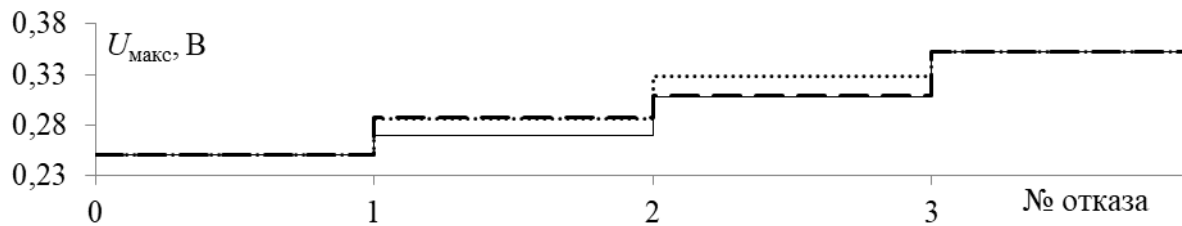


Рисунок 4.13 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов 1 (---), 2 (····), 3 (—) от номера отказа

4.1.3 Многовариантный анализ структуры

Здесь представлены результаты, которые показывают, как влияют параметры структуры на значение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов. Представлены зависимости значений $U_{\text{макс}}$ в диапазонах геометрических параметров структуры от номера отказа на концах пассивных проводников.

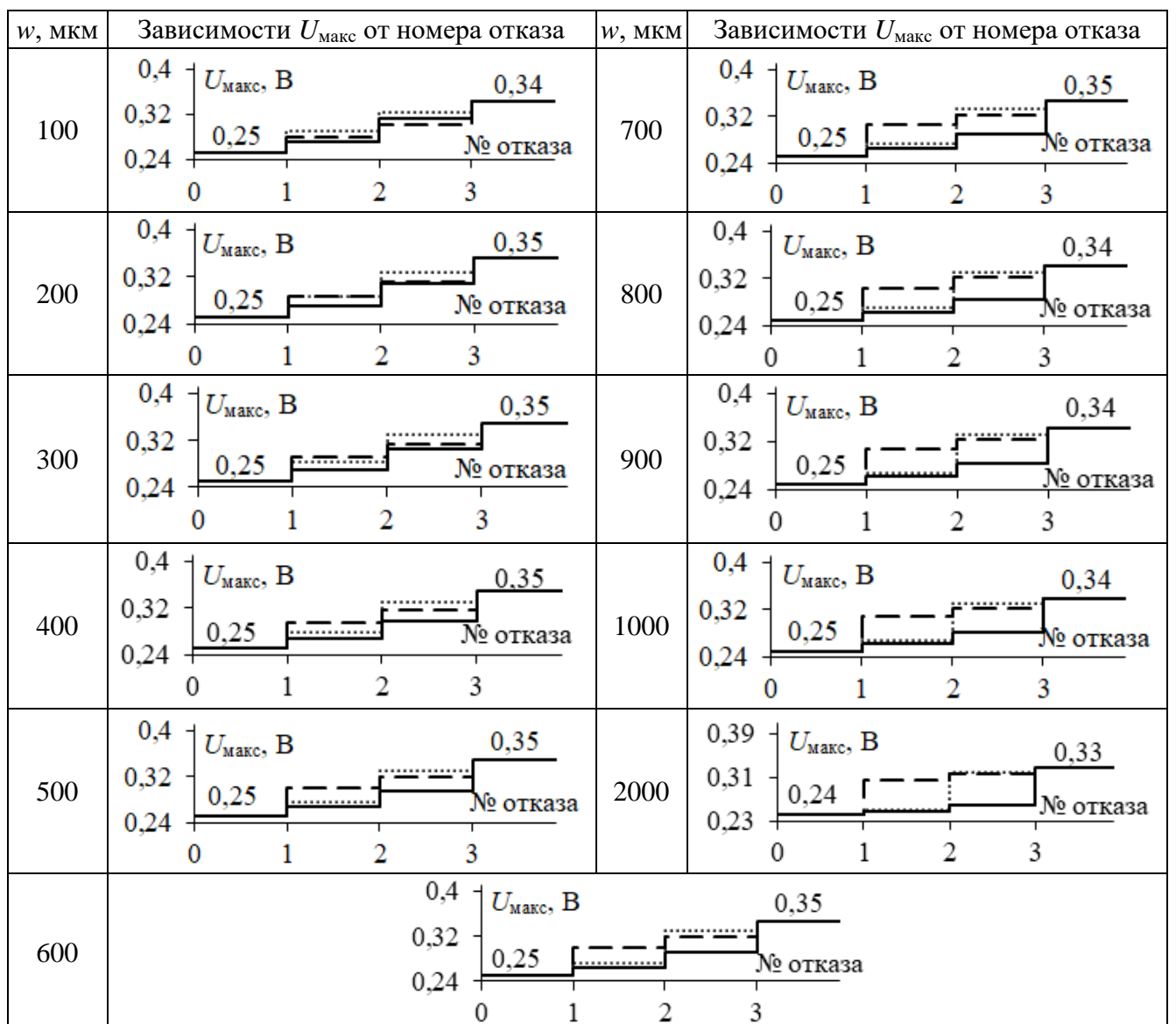
В таблицу 4.3 сведены значения погонных задержек i -ого импульса (τ_i) и волновое сопротивление (R), полученные при исходном наборе параметров. R получалось путем псевдосогласования структуры с половиной ЭДС по отклику. В таблицу 4.4 сведены τ_i и R при изменении w от 100 до 2000 мкм. Значения с исходным набором параметров выделены жирным (здесь и далее). При вычислении значений $U_{\text{макс}}$, нагрузки на концах структуры равны R (условие псевдосогласования). В таблицу 4.5 сведены зависимости $U_{\text{макс}}$, на дальнем конце структуры от номера отказа при различных значениях w .

Таблица 4.3 – Значения τ_i и R

τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м	τ_4 , нс/м	R , Ом
7,165	8,372	8,863	9,171	50

Таблица 4.4 – Значения τ_i и R при изменении w от 100 до 2000

w , мкм	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м	τ_4 , нс/м	R , Ом
100	7,445	8,434	8,755	9,088	60
200	7,165	8,372	8,863	9,171	50
300	7,331	8,284	8,94	9,219	43
400	7,282	8,198	8,999	9,252	37
500	7,236	8,118	9,048	9,277	33
600	7,197	8,046	9,087	9,297	30
700	7,163	7,981	9,119	9,313	27
800	7,134	7,922	9,147	9,326	25
900	7,109	7,869	9,171	9,337	23
1000	7,087	7,82	9,191	9,347	22
2000	6,961	7,51	9,305	9,401	13

Таблица 4.5 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при различных w , и вариантах 1 (····), 2 (---) и 3 (—)

Видно, что почти для всех значений w оптимален вариант переключения 3, так как $U_{\text{макс}}$ для него после отказов 1 и 2 меньше, чем для других вариантов. Однако при значении $w=100$ мкм после отказа 2 для варианта переключения 2 значения $U_{\text{макс}}$ меньше, чем для варианта переключения 3. Так как в основном оптимальным порядком переключения является вариант 3, то далее значения $U_{\text{макс}}$ фиксируются только для него.

На рисунке 4.14а представлены зависимости τ_i от w . На рисунке 4.14б представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от w до и после отказов для варианта переключения 3. Видно, что после отказов 1 и 2 значения $U_{\text{макс}}$ с ростом w уменьшаются от 0,27 до 0,248 В и от 0,309 до 0,26 В, т.е. уменьшения составляют 4 и 9%, соответственно. Для случаев до отказов и после отказа 3 с увеличением w значения $U_{\text{макс}}$ почти не изменяются, а после отказов 1 и 2 – значения $U_{\text{макс}}$ уменьшаются. При этом разность задержек между импульсами 3 и 4 значительно уменьшается.

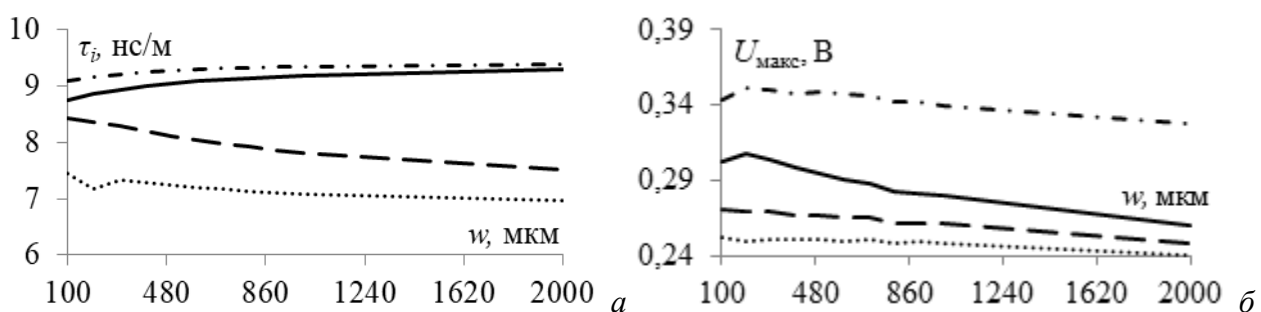


Рисунок 4.14 – Зависимости τ_i от w (а), где $\tau_1(\dots)$, $\tau_2(- - -)$, $\tau_3(-)$, $\tau_4(- \cdot -)$ и $U_{\text{макс}}$ от w (б), где до отказов (\dots), после отказов 1 ($- - -$), 2 ($-$) и 3 ($- \cdot -$) для варианта 3

В таблицу 4.6 сведены значения τ_i и R при изменении s от 100 до 700 мкм. В таблицу 4.7 сведены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при изменении s . Видно, что при $s=100$ мкм после отказа 2 для варианта 2 значение $U_{\text{макс}}$ меньше, чем для варианта 3. Для остальных значений s оптимален вариант 3. На рисунке 4.15а представлены зависимость τ_i от s , а на рисунке 4.15б – $U_{\text{макс}}$ от s до и после отказов для варианта 3. Видно, что до отказов и после отказа 1 значения $U_{\text{макс}}$ слабо зависят от s . После отказа 2 значение $U_{\text{макс}}$ практически не изменяется. После отказа 3 значения $U_{\text{макс}}$ уменьшаются от 0,37 до 0,32 В. Таким образом, с увеличением s значения $U_{\text{макс}}$ уменьшаются после отказов 2 и 3, а разность задержек между импульсами 3 и 4 значительно уменьшается.

Таблица 4.6 – Значения τ_i и R при увеличении s от 100 до 700 мкм

s , МКМ	τ_1 , НС/М	τ_2 , НС/М	τ_3 , НС/М	τ_4 , НС/М	R , Ом
100	7,22025	8,41169	8,74038	9,19062	46
200	7,16511	8,37205	8,86346	9,17113	50
300	7,10635	8,29664	8,92634	9,1405	51
400	7,04455	8,21993	8,9652	9,11076	52
500	6,97922	8,14905	8,98991	9,08645	52,5
600	6,91049	8,08561	9,00539	9,06816	53
700	6,83906	8,02961	9,01473	9,05492	54

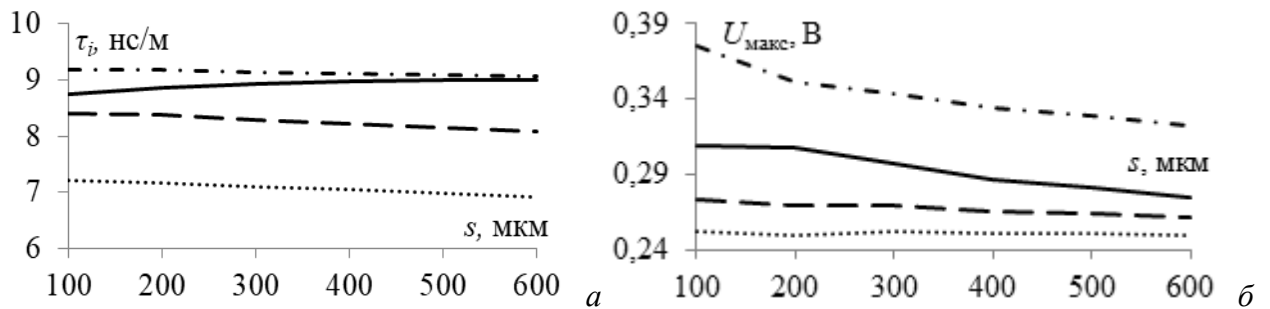


Рисунок 4.15 – Зависимости τ_i от s (а), где τ_1 (····), τ_2 (---), τ_3 (—), τ_4 (-·-) и U_{\max} от s (б), до отказов (····) и после отказов 1 (---), 2 (—) и 3 (-·-) для варианта 3

Таблица 4.7 – Зависимости U_{\max} от номера отказа при различных значениях s , и вариантах 1 (····), 2 (---) и 3 (—)

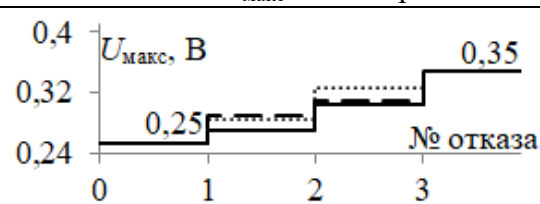
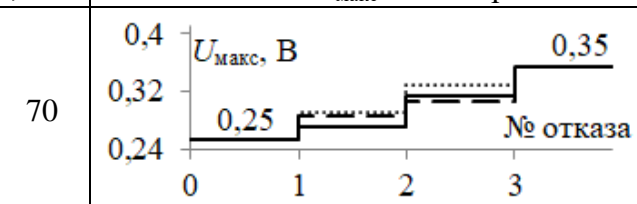
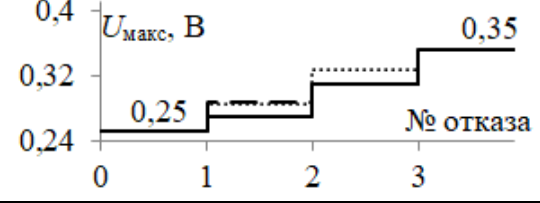
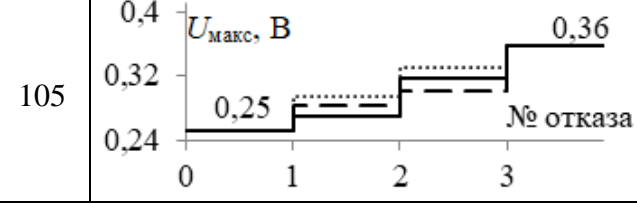
s , МКМ	Зависимости U_{\max} от номера отказа	s , МКМ	Зависимости U_{\max} от номера отказа
100		400	
200		500	
300		600	

В таблицу 4.8 сведены значения τ_i и R при $t=18, 35, 70, 105$ мкм. В таблицу 4.9 сведены зависимости U_{\max} от номера отказа при изменении t . Видно, что для $t=18, 35$ оптимален вариант 3. Однако при $t=70, 105$ мкм после отказа 2 U_{\max} для варианта 2 меньше, чем для варианта 3.

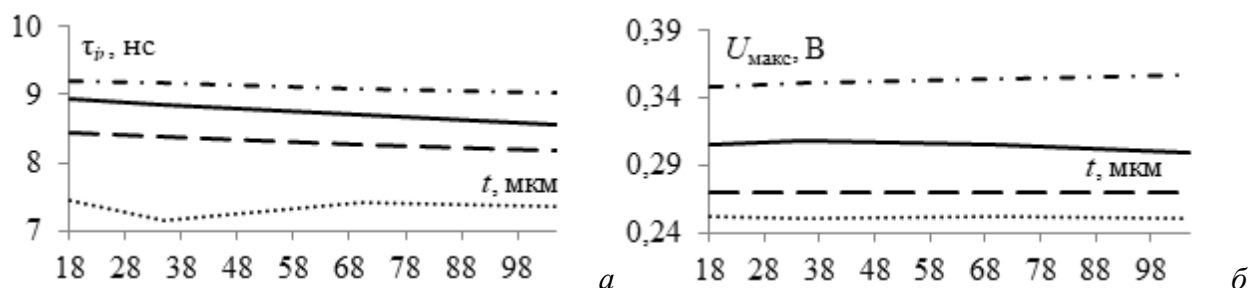
Таблица 4.8 – Значения τ_i и R при изменении t

t , МКМ	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м	τ_4 , нс/м	R , Ом
18	7,44229	8,42735	8,95177	9,21291	51
35	7,16511	8,37205	8,86346	9,17113	50
70	7,40429	8,26919	8,70189	9,09089	46
105	7,36045	8,18276	8,56549	9,02028	44

Таблица 4.9 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при различных значениях t , и вариантах 1 (····), 2 (---) и 3 (—)

t , МКМ	Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа	t , МКМ	Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа
18		70	
35		105	

На рисунке 4.16а представлены зависимости τ_i от t . На рисунке 4.16б представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от t до и после отказов для варианта 3. Видно, что до отказов и после отказов 1, 2 и 3 значения $U_{\text{макс}}$ почти не зависят от t .

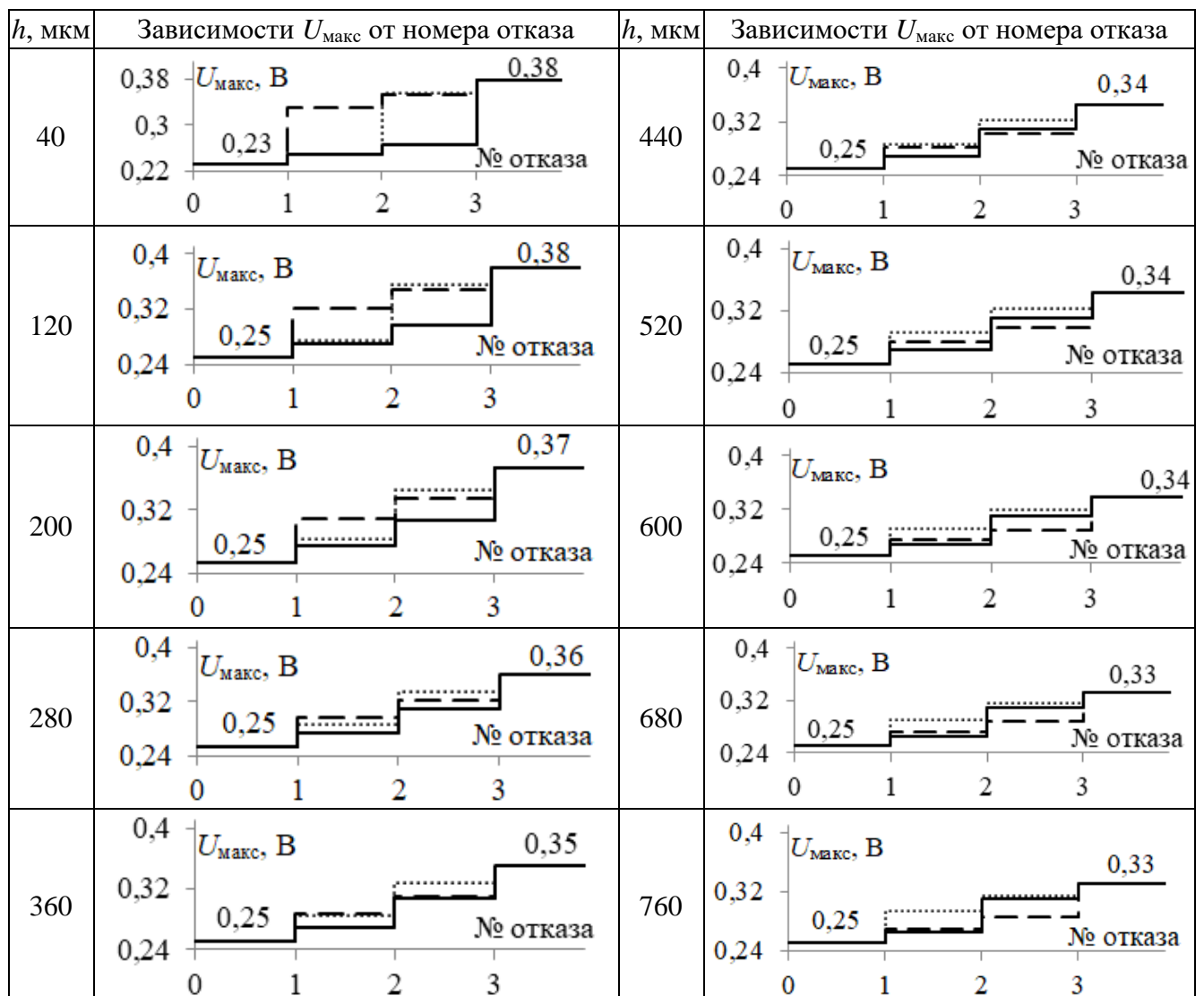
Рисунок 4.16 – Зависимости τ_i от t (а), где τ_1 (····), τ_2 (---), τ_3 (—), τ_4 (-·-) и $U_{\text{макс}}$ от t (б),

до отказов (····) и после отказов 1 (---), 2 (—) и 3 (-·-) для варианта 3

В таблицу 4.10 сведены значения τ_i и R при изменении h_1 от 40 до 760 мкм. В таблицу 4.11 сведены зависимости $U_{\text{макс}}$, вычисленные на дальнем конце структуры, от номера отказа при различных значениях h_1 . Видно, что для значений h_1 от 40 до 360 мкм оптимален вариант 3. С ростом h_1 от 440 до 760 мкм после отказа 2 для варианта 2 значения $U_{\text{макс}}$ меньше, чем для варианта 3.

Таблица 4.10 – Значения τ_i и R при изменении h_1

h_1 , МКМ	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м	τ_4 , нс/м	R , Ом
40	6,71542	7,5802	9,65001	9,80386	35
120	6,87877	7,94268	9,28065	9,56402	42
200	6,99598	8,15304	9,07188	9,40787	46
280	7,08731	8,28498	8,94475	9,28043	48
360	7,16511	8,37205	8,86346	9,17113	50
440	7,21962	8,43175	8,80918	9,07621	51
520	7,26832	8,47397	8,77151	8,99329	51
600	7,30883	8,50464	8,74443	8,92043	52
680	7,34293	8,52747	8,72435	8,85603	52
760	7,37199	8,54485	8,70905	8,79873	52

Таблица 4.11 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при различных значениях h_1 , и вариантах 1 (.....), 2 (---) и 3 (—)

На рисунке 4.17а представлены зависимости τ_i от h_1 . На рисунке 4.17б представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от h_1 до и после отказов для варианта 3. Видно, что после отказа 2 с увеличением h_1 значения $U_{\text{макс}}$ сначала увеличиваются от 0,266 до 0,308 В, а затем уменьшаются до 0,285 В. После отказа 3 значения $U_{\text{макс}}$ уменьшаются с 0,38 до 0,33.

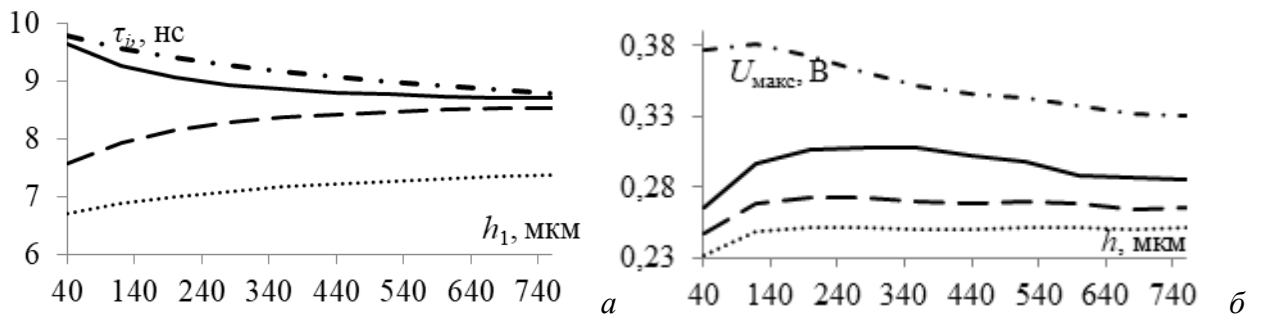


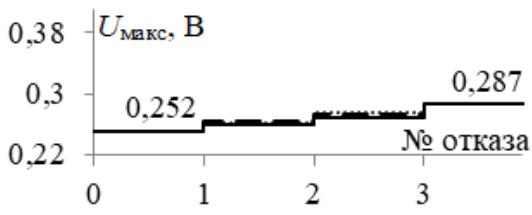
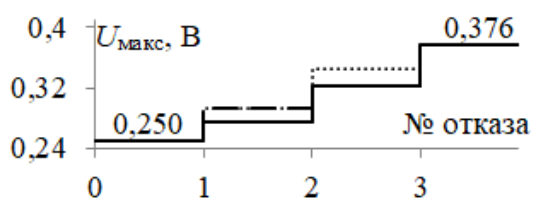
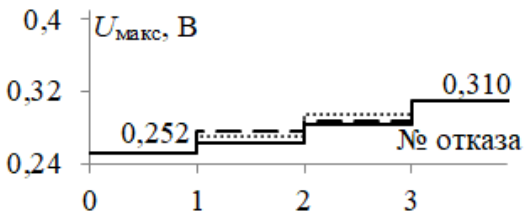
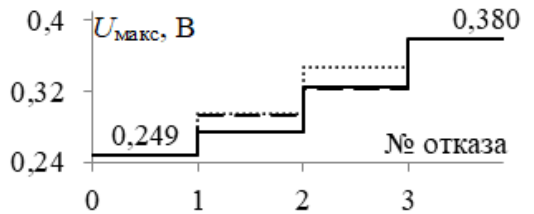
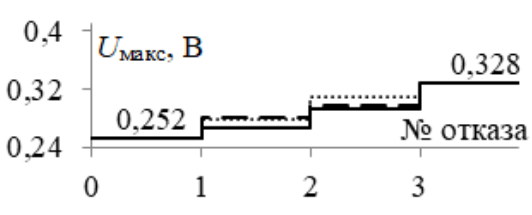
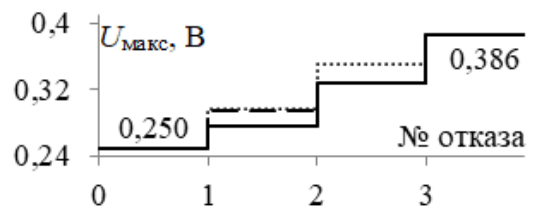
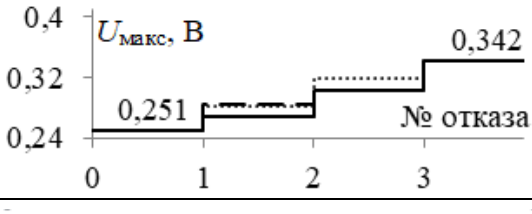
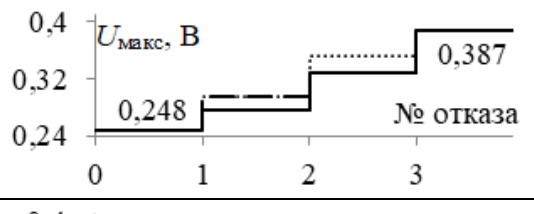
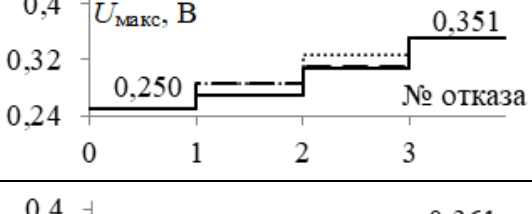
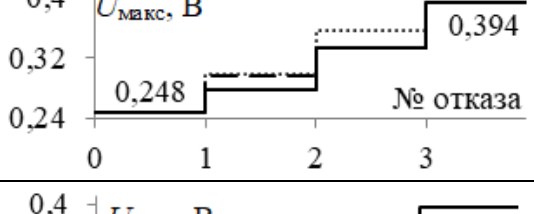
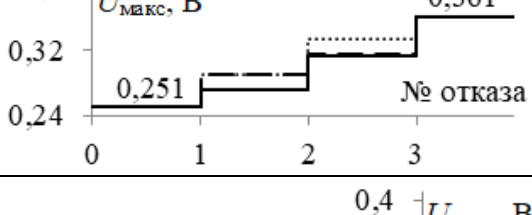
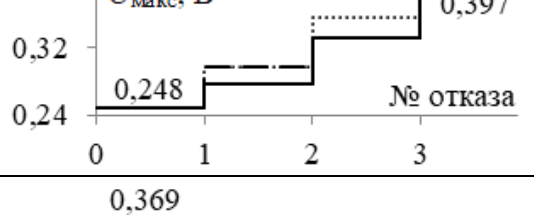
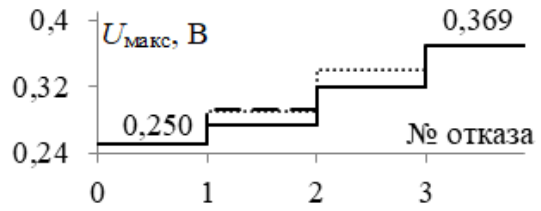
Рисунок 4.17 – Зависимости τ_i от h_1 (а), где τ_1 (····), τ_2 (---), τ_3 (—), τ_4 (-·-) и U_{\max} от h_1 (б), до отказов (····) и после отказов 1 (---), 2 (—) и 3 (-·-) для варианта 3

В таблицу 4.12 сведены значения τ_i и R при изменении h_2 от 40 до 1000 мкм. В таблицу 4.13 сведены зависимости U_{\max} от номера отказа при изменении значений h_2 . Видно, что для всех значений h_2 оптимален вариант 3.

Таблица 4.12 – Значения τ_i и R при изменении h_2

h_2 , МКМ	τ_1 , НС/М	τ_2 , НС/М	τ_3 , НС/М	τ_4 , НС/М	R , Ом
40	6,42327	7,64771	7,81876	7,90724	20
120	6,82271	8,11833	8,5042	8,52845	35
200	6,99649	8,27685	8,73505	8,8404	42
280	7,09724	8,342	8,8217	9,04062	46
360	7,16511	8,37205	8,86346	9,17113	50
440	7,20113	8,38705	8,88566	9,26131	51
520	7,22783	8,39496	8,89837	9,32632	53
600	7,24539	8,39931	8,90607	9,37475	54
680	7,25689	8,40177	8,91096	9,41181	55
760	7,26434	8,40321	8,91419	9,44079	56
840	7,26907	8,40406	8,91638	9,46388	57
920	7,27198	8,40458	8,91792	9,48257	59
1000	7,27368	8,40489	8,91902	9,4979	59

Таблица 4.13 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при различных значениях h_2 , и вариантах 1 (.....), 2 (---) и 3 (—)

h_1 , мкм	Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа	h_1 , мкм	Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа
40		600	
120		680	
200		760	
280		840	
360		920	
440		1000	
520			

На рисунке 4.18а представлены зависимости τ_i от h_2 . На рисунке 4.18б представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от h_2 до и после отказов для варианта 3. После отказов 1, 2 и 3 с ростом h_2 значения $U_{\text{макс}}$ увеличиваются на 2, 11 и 16%, соответственно.

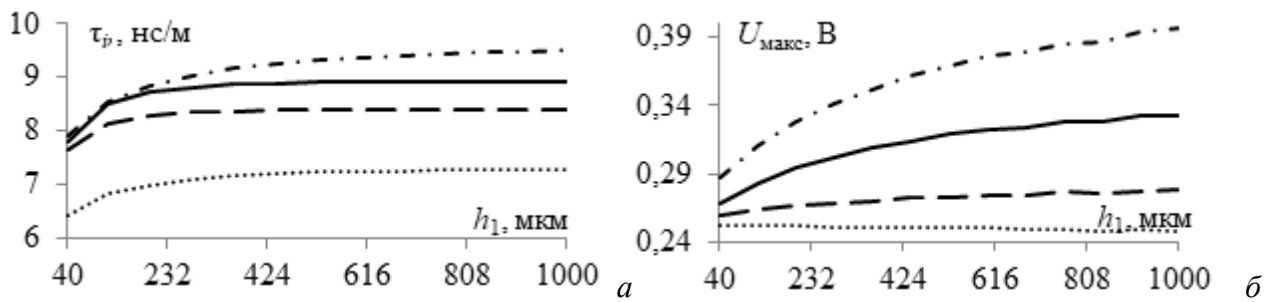


Рисунок 4.18 – Зависимости τ_i от h_2 (а), где τ_1 (····), τ_2 (---), τ_3 (—), τ_4 (-·-) и U_{\max} от h_2 (б), до отказов (····) и после отказов 1 (---), 2 (—) и 3 (-·-) для варианта 3

Таким образом, из таблиц 4.5 – 4.13 видно, что при обеспечении согласования в структуре с симметрией поперечного сечения до отказов, значение U_{\max} остается практически неизменным и равно 0,25 В. Однако после отказов согласование нарушается, и значение U_{\max} зависит от геометрических параметров поперечного сечения. Наименьшее U_{\max} в результате перебора всех случаев отказов (63 случаев, включая случай до отказа) обеспечивается после отказа 3. Выполнена оценка влияния параметров поперечного сечения структуры на значение U_{\max} до и после отказов. Выявлено, что при изменении w и t значение U_{\max} после отказа 3 неизменно во всем диапазоне. С ростом s , U_{\max} после отказа 3 уменьшается от 0,38 до 0,32 В (на 16%). С ростом h_1 , U_{\max} после отказа 3 уменьшается от 0,38 до 0,33 В (на 13%). С ростом h_2 , U_{\max} после отказа 3 увеличивается от 0,29 до 0,40 В (на 38%). Таким образом, возникает необходимость в дополнительной оптимизации параметров поперечного сечения структуры с учетом имитации отказа 3, так как оптимизация до отказа не позволяет сохранить минимальное значение U_{\max} после отказов.

4.1.4 Основные результаты подраздела

В результате, представлены геометрические модели структур, для исследования структуры выбраны, так как они симметричны по двум осям в поперечном сечении, так что, активным проводником до отказов может быть любой из четырех, а характеристики на дальнем конце не будут отличаться друг от друга. Представлены схемные модели, имитирующие реальные отказы на концах проводников (отказы их элементов) и вдоль проводников ЛП с трехкратным МР. Представлена эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР. Она упростит анализ представленных структур с учетом отказов на концах и вдоль проводников. Проведен одновариантный анализ структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу с учетом отказов на концах проводников. Показано что для варианта переключения 3 после отказов 1 и 2 U_{\max} меньше, чем для других, на 3,2 и 3,1%, соответственно. Данный

пример показывает простоту анализа данных структур, однако не учитывает отказы вдоль проводников. Проведен многовариантный анализ данной структуры, показавший, что, в зависимости от геометрических параметров, $U_{\text{макс}}$ до отказов изменяется незначительно, но после отказов может изменяться значительно.

Таким образом, для детального исследования сначала необходимо выполнить моделирование структур с трехкратным МР до и после отказов на концах и вдоль проводников. Для систематизации большого количества вычислений и проделанного объема работы, полезно разработать алгоритм анализа структур с учетом отказов на концах и вдоль проводников. Также необходимо выполнить ряд экспериментальных исследований на основе уже разработанных прототипов ПП, а также разработать недостающие прототипы ПП для экспериментальной оценки изменения $U_{\text{макс}}$ после отказов.

4.2 Моделирование структур с трехкратным модальным резервированием до и после отказов на концах и вдоль проводников

Здесь приведены результаты моделирования структур с трехкратным модальным резервированием до и после отказов на концах и вдоль проводников. Моделирование проводилось в системе TALGAT без учета потерь в проводниках и диэлектриках, на основе общего алгоритма исследования, представленного в пункте 1.3.1. Данные результаты опубликованы в [124–126]. Для каждой структуры получены исходные и оптимальные наборы параметров [102]. Их оптимизация для всех структур проводилась эвристическим поиском по критериям выравнивания амплитуд и временных интервалов импульсов разложения. Для структуры с исполнением опорного проводника в центре (рисунок 4.1а) при оптимизации значения s и w изменялись в диапазоне 50–2000 мкм; t – 18–175 мкм; h – 200–3000 мкм, а d – 200–2000 мкм. Для структуры с исполнением опорного сверху и снизу (рисунок 4.1б) при оптимизации значения s и w изменялись в диапазоне 50–2000 мкм; t – 18–175 мкм; h – 200–3000 мкм, а d – 200–2000 мкм. Для структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов (рисунок 4.1в) при оптимизации значения s , w и w_1 изменялись в диапазоне 50–2000 мкм; t – в диапазоне 18–175 мкм; h – в диапазоне 200–3000 мкм, а d – в диапазоне 200–2000 мкм. Исходный набор параметров – это неоптимизированный набор с невыравненными амплитудами и временными интервалами импульсов разложения. Здесь рассматривается, как оптимизация по этим критериям изменит $U_{\text{макс}}$ после отказов. Предварительно в пункте 4.1.3 показано, что изменение геометрических параметров практически не влияет на $U_{\text{макс}}$ до отказов, но после отказов $U_{\text{макс}}$ сильно зависит от них.

4.2.1 Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием

Здесь приводится алгоритм анализа структур с трехкратным МР (рисунок 4.1) после отказов на концах и вдоль проводников. После того, как для каждой структуры выполняются пункты 1–4 общего алгоритма моделирования в системе TALGAT (пункт 1.3.1.), выполняется пункт 5, в котором считается, что структура без отказов, если все нагрузки на концах резервируемого и резервных проводников согласованы со структурой (по половине ЭДС для амплитуды напряжения на входе). На рисунке 4.2а представлена эквивалентная схема каждой из структур с трехкратным МР, где R – согласующая нагрузка структуры длиной l .

Далее представлен алгоритм анализа структур с трехкратным МР после отказов [124]. Данный алгоритм выполняется на основе пункта 5 общего алгоритма (из пункта 1.3.1).

1. Определение U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника до отказов при $t_{\Sigma} < l \cdot \min|\Delta\tau_i|$, где l – длина всей структуры, t_{Σ} – общая длительность воздействующего импульса.
2. Расчет значений U_{\max} в конце активного проводника после отказов 1, 2, 3 на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
3. Построение зависимостей U_{\max} от номера отказа на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
4. Представление структуры в виде N отрезков длиной l/N , где l – длина всей структуры.
5. Расчет значений U_{\max} после отказов 1, 2, 3 (для выбранных схемных моделей) вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
6. Построение зависимостей U_{\max} от номера отказа вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
7. Анализ полученных результатов.

На рисунке 4.8 представлена эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов и вдоль активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР [102].

Результаты апробации алгоритма (представленные в [124]) показали, что при анализе структур с трехкратным МР целесообразно использовать импульс с $t_{\Sigma} \approx l \cdot \min|\Delta\tau_i|$. Значения U_{\max} для исследуемых структур при исходном и оптимальном наборах параметров после отказов 1, 2 и 3 на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3 рассмотрены в [102] (рассмотрены пункт 2 и 3 алгоритма). Подробный разбор пунктов 2 и 3 алгоритма приведен в пункте 4.1.2. При анализе структуры после отказов 1 и 2 вдоль проводников представим их в виде 10 и 4 отрезков, соответственно. Это обусловлено тем, что максимальные изменения U_{\max} наблюдаются при отказах посередине и примерно $\frac{1}{4}$ и $\frac{3}{4}$ длины проводника. С целью анализа структуры после отказа 2, выполнено 27 вычислений (27 случаев отказов) для вариантов

переключения 1, 2 и 3 при отказах 1 и 2 вдоль проводника структур с исходным и оптимальными наборами параметров на одном расстоянии от начала ЛП. Так как проводить 153 вычисления (как это сделано в [124]) нецелесообразно. Отказ 3 не рассматривается, так как он не влияет на порядок переключения. Рассматриваются схемные модели, имитирующие отказы вдоль проводника в произвольном месте, представленные на рисунках 4.4 и 4.5. При этом, ситуация при отказах с замыканием на соседний проводник (рисунок 4.5а, б и в) рассмотрена только после первого отказа 1 и анализируется отдельно, так как отказывают сразу два проводника.

4.2.2 Структура с исполнением опорного проводника в центре

Здесь представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР после отказов на концах и вдоль проводников для структуры с исполнением опорного проводника в центре.

Поперечное сечение структуры представлено на рисунке 4.19. Исходный набор параметров: $s=400$ мкм; $w=300$ мкм; $t=105$ мкм; $h=300$ мкм; $\epsilon_r=5$. Оптимальный набор параметров: $s=510$ мкм; $w=1600$ мкм; $t=18$ мкм; $h=500$ мкм; $d=1600$ мкм. Эквивалентная схема структуры приведена на рисунке 4.2а.

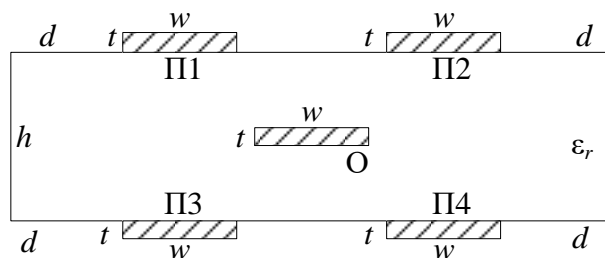


Рисунок 4.19 – Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника в центре, где проводники П1, П2, П3 и П4 сигнальные (резервируемый и резервные), а О – опорный

На вход структуры длиной 0,5 м, с исходным и оптимальным наборами параметров до отказов, подавались импульсы с ЭДС 2 В с $t_{\Sigma}=70$ и 80 пс, соответственно, в соответствии с пунктом 1 алгоритма, рассмотренного выше, для каждого набора параметров так, чтобы $t_{\Sigma} \approx l \cdot \min|\Delta\tau_i|$. Из вычисленных откликов на выходе (рисунок 4.20) видно, что воздействующие импульсы раскладываются на 4 импульса с $U_{\max} \approx 0,25$ В.

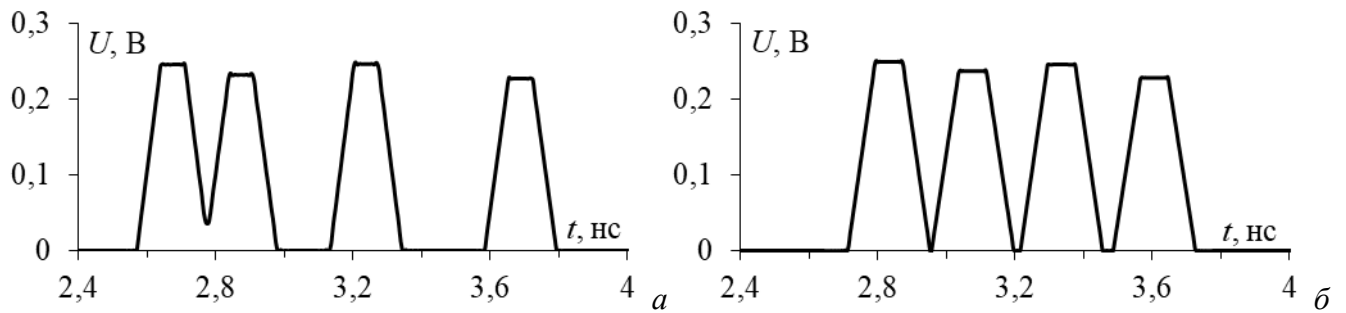


Рисунок 4.20 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника структуры до отказов для исходного (а) и оптимизированного (б) наборов параметров

На рисунке 4.21 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для структуры с исходным и оптимальным наборами параметров для вариантов переключения 1, 2, 3.

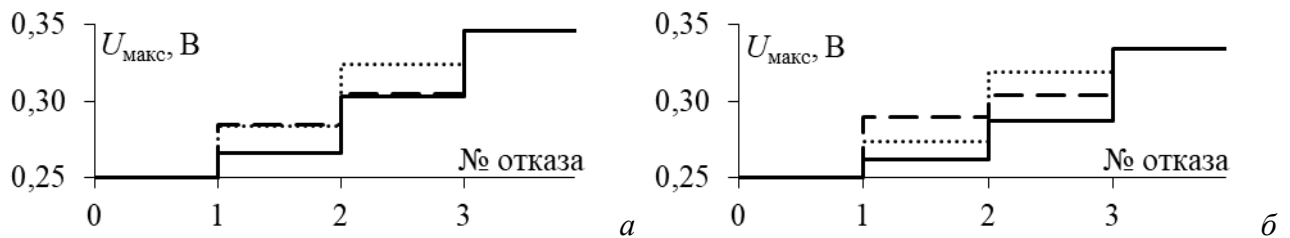


Рисунок 4.21 – Зависимости значений $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1 (⋯), 2 (---), 3 (—) структур с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

Из рисунка 4.21а видно, что с исходным набором параметров, при вариантах переключения 1, 2, 3, после отказа 1 наблюдается рост $U_{\text{макс}}$ до 0,284, 0,285 и 0,266 В, соответственно, после отказа 2 – до 0,324, 0,305 и 0,303 В, а после отказа 3 – до одинакового уровня 0,346 В, который не зависит от порядка переключения. Оптимален вариант переключения 3, так как значения $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 минимальны (0,266 и 0,303 В).

Из рисунка 4.21б видно, что с оптимальным набором параметров, при вариантах переключения 1, 2, 3, после отказа 1 наблюдается рост значения $U_{\text{макс}}$ до 0,274, 0,29 и 0,262 В, соответственно, после отказа 2 – до 0,319, 0,304 и 0,287 В, а после отказа 3 – до 0,334 В. Оптимален вариант переключения 3, так как значения $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 минимальны (0,262 и 0,287 В).

На рисунке 4.22 представлены оптимальные варианты переключения в зависимости от номера отказов на концах проводников для исходного и оптимального наборов.

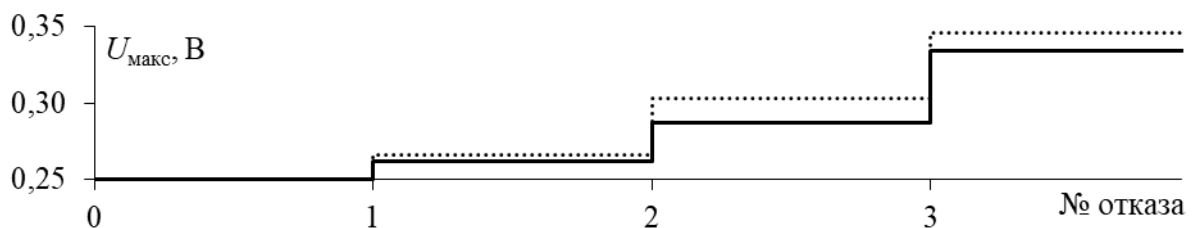


Рисунок 4.22 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ при оптимальном порядке переключения для структуры с исходным (⋯) и оптимальным (—) наборами параметров от отказов на концах проводников

Видно, что при оптимальных порядках переключения для исходного и оптимального наборов параметров после отказа 1 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,266 и 0,262 В, а после отказа 2 – до 0,303 и 0,287 В, а после отказа 3 – до 0,346 и 0,334 В, соответственно. Таким образом, у структуры с оптимизированным набором параметром значения $U_{\text{макс}}$ после отказов 1, 2, 3 меньше, и она более предпочтительна, чем структура с исходным набором параметров, при отказах на концах проводников.

Далее рассматривается влияние отказов вдоль проводников на $U_{\text{макс}}$ на дальнем конце резервируемого проводника. Схемные модели отказов вдоль проводников представлены на рисунках 4.4 и 4.5. На рисунках 4.23, 4.24 и 4.25 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от длины участка l_1 при отказах вдоль проводника структуры с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

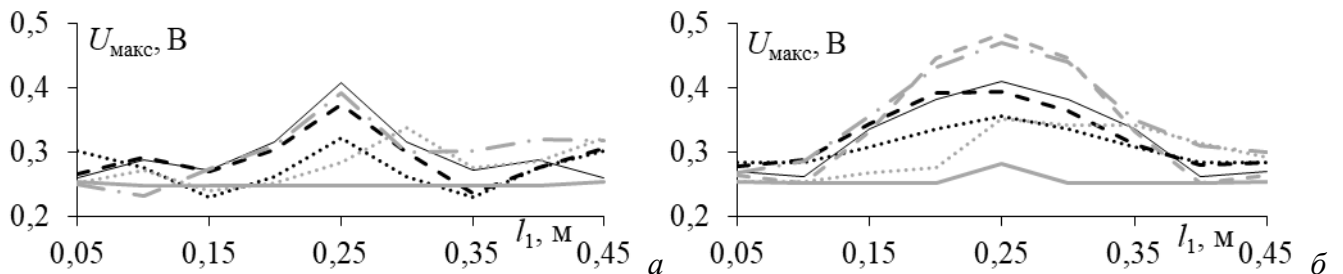


Рисунок 4.23 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3–XX) (---), К3–К3 (—), XX–замыкание на П3 (- - -), XX–замыкание на П4 (— · —), замыкание на П3 (- · - ·), К3 на П4 (····) варианта переключения 1 для структуры с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

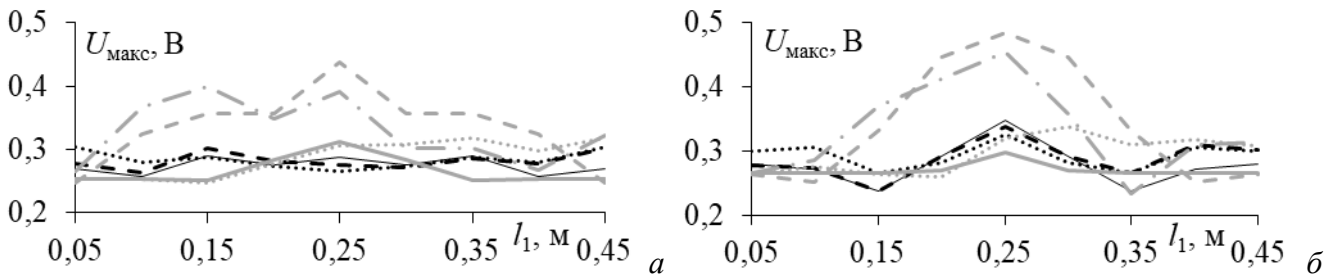


Рисунок 4.24 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3–XX) (---), К3–К3 (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (— · —), замыкание на П2 (- · - ·), замыкание на П4 (····) варианта переключения 2 для структуры с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

Из рисунков 4.23а, 4.24а и 4.25а видно, что $U_{\text{макс}}$ увеличивается до 0,41, 0,43 и 0,35 В, соответственно. При этом, для рисунков 4.23а и 4.24а наибольшее $U_{\text{макс}}$ наблюдается при отказах на середине резервируемого проводника, для рисунка 4.25а – на расстоянии 0,1 м. Из рисунков 4.23б, 4.24б и 4.25б видно, что $U_{\text{макс}}$ изменяется до 0,48, 0,48 и 0,33 В, соответственно. При этом, для рисунков 4.23б и 4.24б наибольшее $U_{\text{макс}}$ наблюдается на середине ЛП, а для рисунков 4.25б – на расстоянии 0,1 м.

На рисунке 4.26 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 2 вдоль проводника на одном расстоянии от начала ЛП от номер отказа.

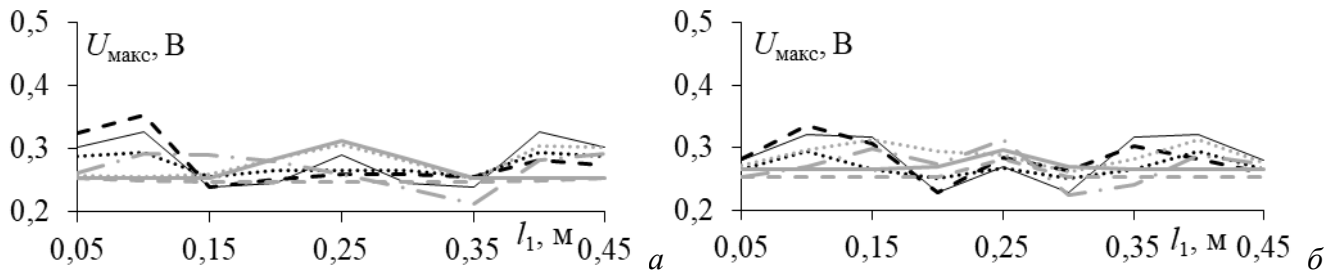


Рисунок 4.25 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от l_1 при отказе типов XX-XX (····), XX-K3 (K3-XX) (- -), K3 – K3 (—), XX-замыкание на П2 (- · - ·), XX-замыкание на П3 (—), замыкание на П2 (- · - ·), замыкание на П3 (····) варианта переключения 3 для структуры с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

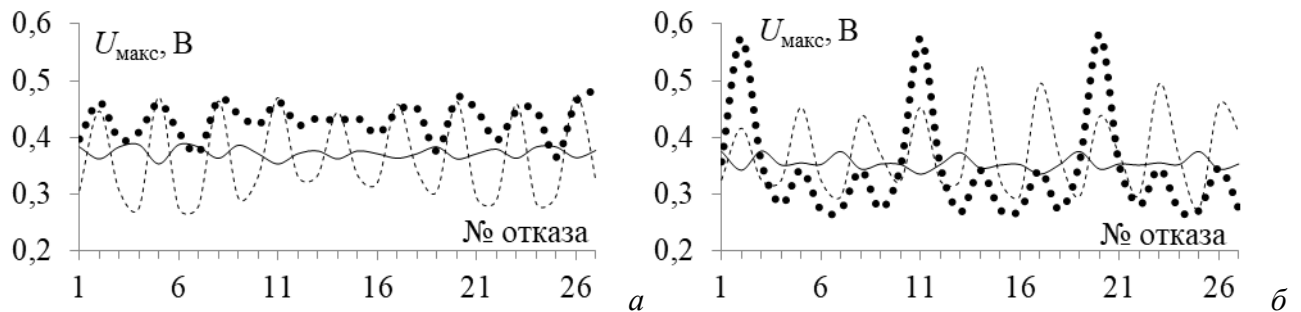


Рисунок 4.26 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходными (а) и оптимизированным (б) наборами параметрами после отказа 2 от номера отказа при вариантах переключения 1 (- · - ·), 2 (··) и 3 (—)

Из рисунка 4.26а видно, что $U_{\text{макс}}$ изменяется до 0,46, 0,48 и 0,38 В для вариантов 1, 2 и 3, соответственно. Из рисунка 4.26б видно, что $U_{\text{макс}}$ изменяется до 0,53, 0,57 и 0,37 В для вариантов 1, 2 и 3, соответственно. При варианте 3 для рисунков 4.26а и б, наблюдаются наименьшие значения и перепады $U_{\text{макс}}$ при 27 вычислениях.

На рисунке 4.27 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов переключения 1, 2, 3 после отказов вдоль проводников.

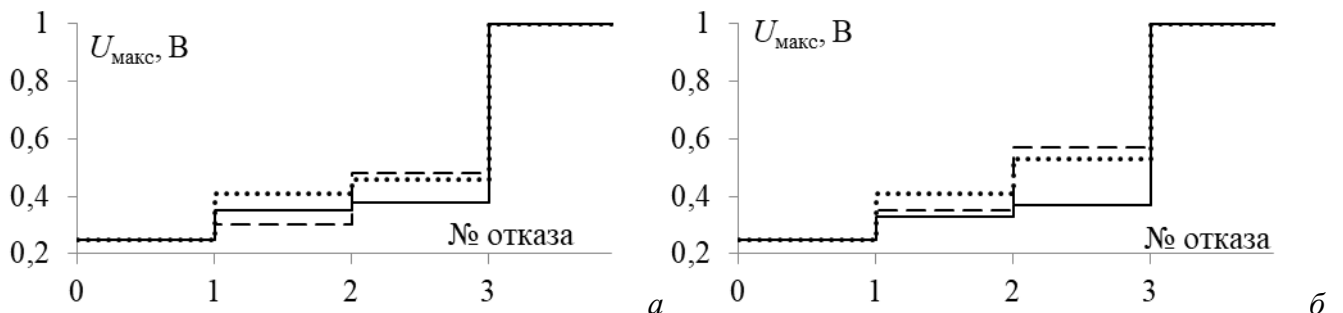


Рисунок 4.27 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов переключения 1 (····), 2 (- -), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и оптимизированным (б) параметрами

Из рисунке 4.27а видно, что после отказа 1 для варианта 2 наименьшее $U_{\text{макс}}=0,3$ В, а после отказа 2 наименьшее $U_{\text{макс}}=0,38$ В для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров. Из рисунка 4.27б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения $U_{\text{макс}}$ у варианта 3. Они равны 0,33 и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения 3. В таблице 4.14 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов 1, 2, 3 от номера отказов вдоль проводников, а также отказа вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом) в сравнении с отказами на концах проводников.

Таблица 4.14 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце (—), вдоль проводников (- - -) и двух проводников одновременно (—)

Вариант	Исходные параметры	Оптимальные параметры
1		
2		
3		

Видно, что изменение $U_{\text{макс}}$ для оптимального варианта переключения (вариант 3) меньше, чем для остальных. При этом, $U_{\text{макс}}$ при отказах сразу двух проводников входит в диапазон $U_{\text{макс}}$. Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структур с

оптимизированным набором параметров следует, что оптимален вариант переключения 3, поскольку значения U_{\max} после отказов 1 и 2 на 13 и 69% меньше, чем для вариантов 1 и 2.

4.2.3 Структура с исполнением опорного проводника сверху и снизу (многослойная печатная плата)

Далее представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР для структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу после отказов на концах и вдоль проводников. Поперечное сечение структуры представлено на рисунке 4.28. Исходные параметры поперечного сечения: $s=200$ мкм, $w=200$ мкм, $t=35$ мкм, $h=180$ мкм, $\epsilon_{r1}=10$, $\epsilon_{r2}=4,3$, расстояние от стенок до структуры 360 мкм (сверху и снизу). Оптимальные параметры: $s=200$ мкм (без изменений); $w=260$ мкм; $t=135$ мкм; $h=100$ мкм; ϵ_r не менялись. Эквивалентная схема структуры приравнена на рисунке 4.2а.

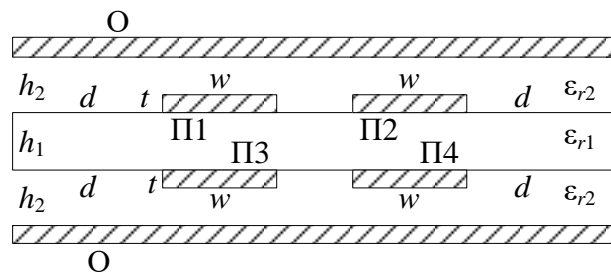


Рисунок 4.28 – Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу, где проводники: П1, П2, П3, П4 – сигнальные (резервируемый и резервные); О – опорный

На вход структуры длиной 0,5 м, с исходным и оптимальным наборами параметров до отказов, подавались импульсы с ЭДС 2 В и $t_{\Sigma}=50, 120$ пс, соответственно (в соответствии с пунктом 1 алгоритма, рассмотренного выше, для каждого набора параметров). Из вычисленных форм напряжений на дальнем конце активного проводника видно (рисунок 4.29), что воздействующие импульсы раскладываются на 4 импульса со значениями U_{\max} по 0,25 и 0,243 В для исходного и оптимизированного наборов параметров, соответственно.

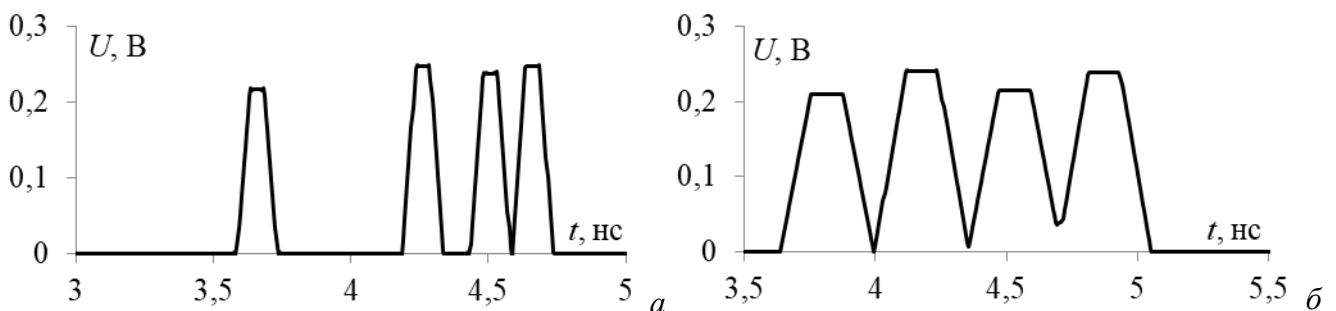


Рисунок 4.29 – Формы напряжений на дальнем конце активного проводника структуры для исходного (а) и оптимизированного (б) наборов параметров

На рисунке 4.30 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для структур с исходным и оптимальным наборами параметров для вариантов переключения 1, 2, 3.

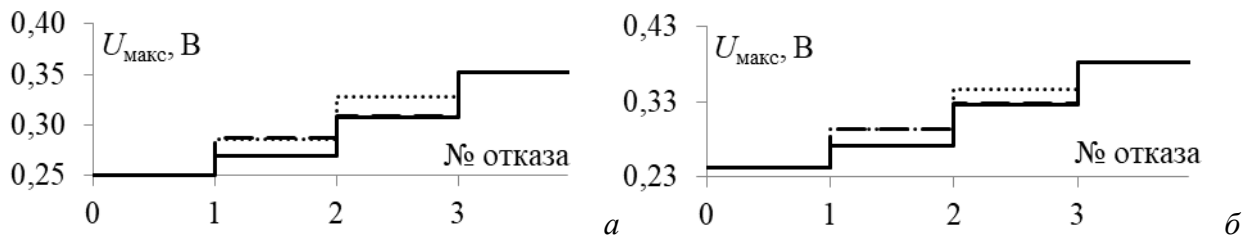


Рисунок 4.30 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1 (····), 2 (---), 3 (—) структуры с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

Из рисунка 4.30а видно, что для вариантов 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,286, 0,287 и 0,269 В, а после отказа 2 – до 0,328, 0,309 и 0,308 В, соответственно. После отказа 3 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,352 В, но он не влияет на порядок переключения. Таким образом, для данной структуры оптимален вариант 3, так как значения $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 минимальны из всех вариантов и равны 0,269 и 0,308 В.

Из рисунка 4.30б видно, что для вариантов 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,293, 0,294 и 0,271 В, а после отказа 2 – до 0,347, 0,328 и 0,327 В, соответственно. После отказа 3 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,383 В, но он не влияет на порядок переключения. Таким образом, для данной структуры оптимален вариант 3, так как значения $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 минимальны из всех вариантов и равны 0,271 и 0,327 В. В итоге, до отказов в структуре с оптимальными параметрами $U_{\text{макс}}$ принимает наименьшее значение, чем в структуре с исходными параметрами. Однако после отказа 3 $U_{\text{макс}}$ становится наибольшим.

На рисунке 4.31 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ для оптимального варианта 3 от номера отказа на концах проводников для исходного и оптимального наборов параметров.

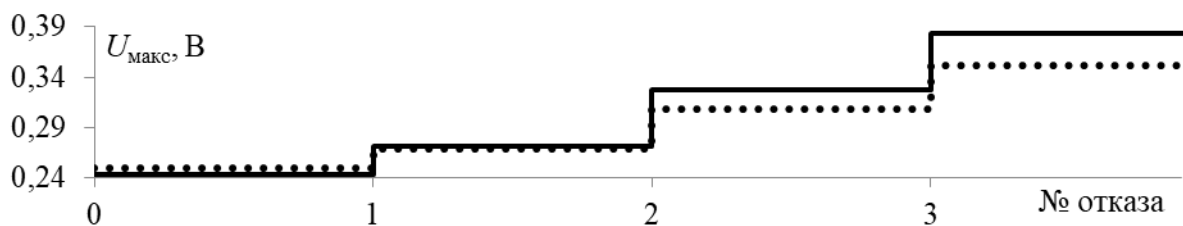


Рисунок 4.31 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ при оптимальном варианте 3 порядка переключения для структуры с исходным (····) и оптимальным (—) наборами параметров от отказов

Видно, что при оптимальном порядке переключения в структуре с исходным набором после отказа 1 $U_{\text{макс}}$ растет до 0,269, а в структуре с оптимальным набором – до 0,271 В, после отказа 2 – до 0,308 и 0,327 В, а после отказа 3 – до 0,352 и 0,383 В, соответственно.

На рисунках 4.32, 4.33 и 4.34 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от l_1 при отказах вдоль проводника после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

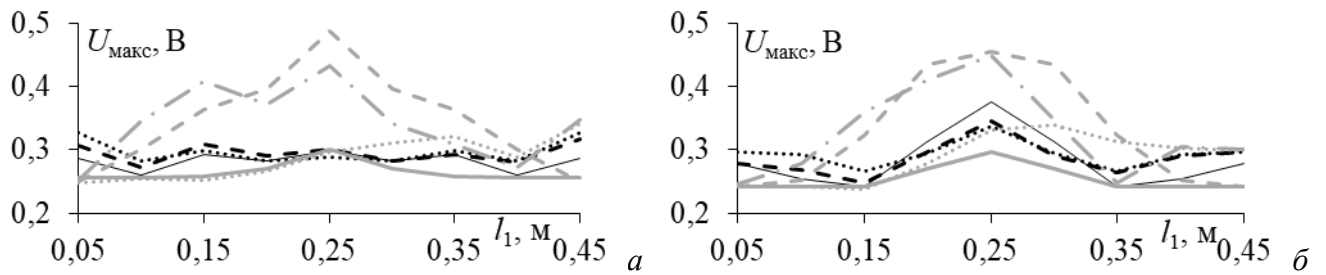


Рисунок 4.32 – Зависимости U_{\max} от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3 – XX) (- - -), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П3 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П3 (- · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 1 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

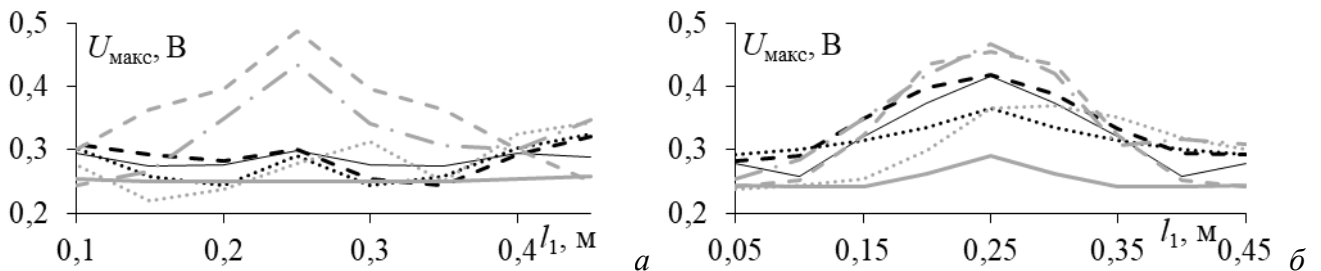


Рисунок 4.33 – Зависимости U_{\max} от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3 – XX) (- - -), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 2 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

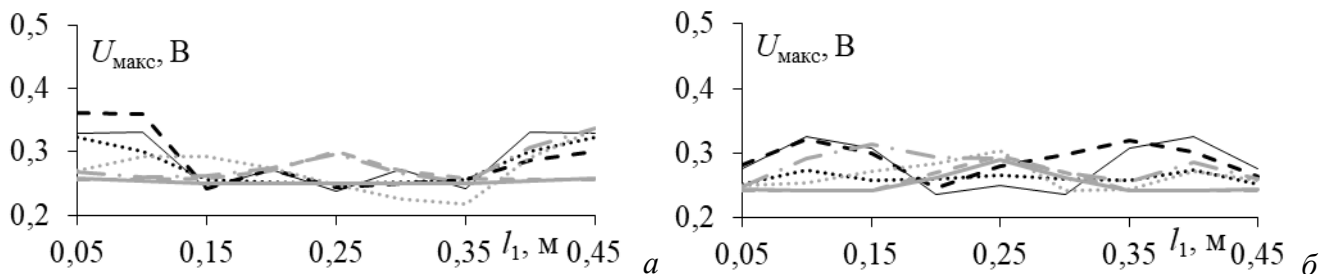


Рисунок 4.34 – Зависимости U_{\max} от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3 – XX) (- - -), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П3 (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на П3 (····) для варианта переключения 3 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

Из рисунков 4.32а, 4.33а и 4.34а видно, что U_{\max} изменяется до 0,33, 0,32 и 0,33 В, соответственно. Из рисунков 4.32б, 4.33б и 4.34б видно, что U_{\max} изменяется до 0,37, 0,42 и 0,33 В, соответственно.

На рисунке 4.35 представлены зависимости U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 2 вдоль проводника на одном расстоянии от начала ЛП, от номера отказа.

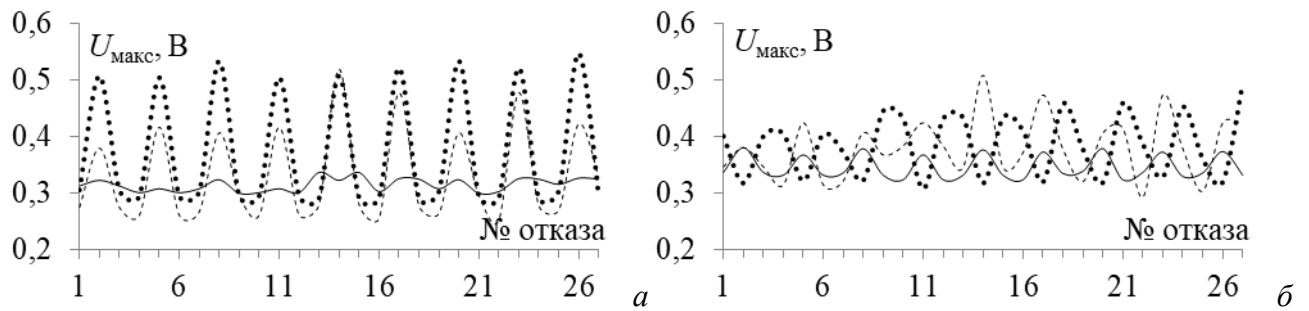


Рисунок 4.35 – Зависимости U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника

структур с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров после отказа 2 от номера отказа при вариантах переключения 1 (· ·), 2 (— ·) и 3 (—)

Из рисунка 4.35а видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 2 наблюдается изменение значения U_{\max} до 0,52, 0,55 и 0,34 В, соответственно. После отказа 2 оптимален вариант переключения 3 для структуры с исходными параметрами, а для рисунка 4.35б наблюдается изменение U_{\max} до 0,52, 0,55 и 0,34 В, соответственно. После отказа 2 оптимален вариант переключения 3 для структуры с оптимизированными параметрами.

На рисунке 4.36 представлены зависимости U_{\max} , для вариантов переключения 1, 2, 3, от номера отказа.

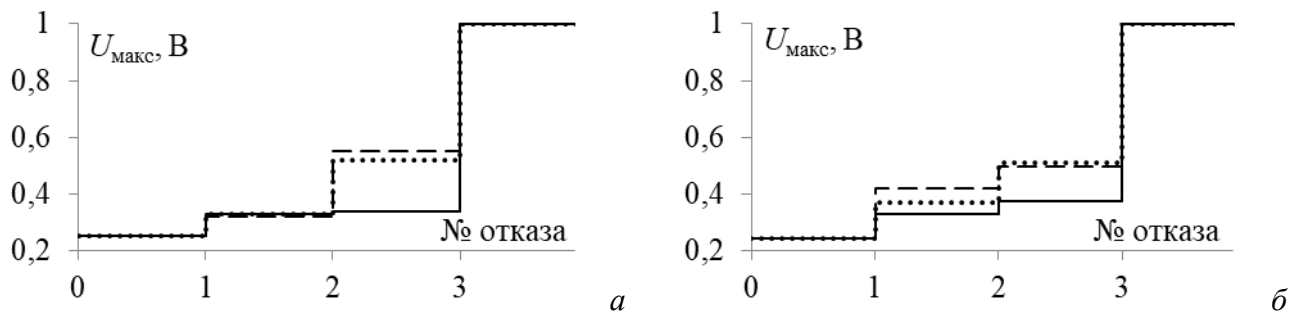


Рисунок 4.36 – Зависимости U_{\max} для вариантов 1 (· · ·), 2 (— ·), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

Из рисунка 4.36а видно, что после отказа 1 для варианта 2 будет наименьшее значение $U_{\max}=0,3$ В, а после отказа 2 наименьшее значение $U_{\max}=0,38$ В будет для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров. Из рисунка 4.36б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения U_{\max} будут у варианта 3. Они равны 0,33 В и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения проводников 3.

В таблице 4.15 представлены зависимости U_{\max} для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце и вдоль проводников, а также отказов вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом).

Таблица 4.15 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов 1, 2, 3 от номера отказа на конце (—), вдоль проводников (- - -) и двух проводников одновременно (—)

Вариант	Исходные параметры	Оптимизированные параметры
1		
2		
3		

Видно, что изменение значения $U_{\text{макс}}$ для оптимального варианта переключения меньше, чем для вариантов 1 и 2. При этом $U_{\text{макс}}$ для отказов сразу двух проводников входит в диапазон $U_{\text{макс}}$ для отказов на конце и вдоль проводников. Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структур с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 на 8 и 54% меньше, чем для наихудшего варианта.

4.2.4 Структура с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов

Здесь представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР, для структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов [10], после отказов на концах и вдоль проводников. Поперечное сечение структуры представлено на рисунке 4.37. Исходные параметры поперечного сечения:

$s=510$ мкм; $w=1600$ мкм; ширина опорного проводника $w_1=1600$ мкм; $t=35$ мкм; $h=500$ мкм; $d=1600$ мкм (в данной структуре это расстояние между опорным проводником до ближайшего сигнального); $\epsilon_r=4,5$. Оптимальные параметры: $s=220$ мкм; $w=500$ мкм; $w_1=1600$ мкм (без изменений); $t=18$ мкм; $h=300$ мкм; $d=800$ мкм.

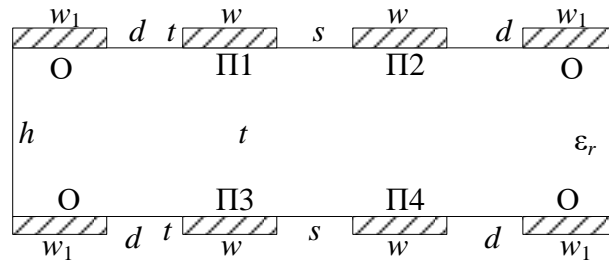


Рисунок 4.37 – Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов (двусторонняя ПП), где проводники: П1, П2, П3, П4 – сигнальные (резервируемый и резервные); О – опорный

На вход структуры длиной 0,5 м с исходным и оптимизированным наборами параметров до отказов, подавались импульсы с ЭДС 2 В с $t_{\Sigma}=70, 80$ пс, соответственно (в соответствии с пунктом 1 алгоритма, рассмотренного выше, для каждого набора параметров). Из вычисленных откликов на выходе (рисунок 4.38) видно, что воздействующие импульсы раскладываются на 4 импульса с $U_{\max}=0,25$ В.

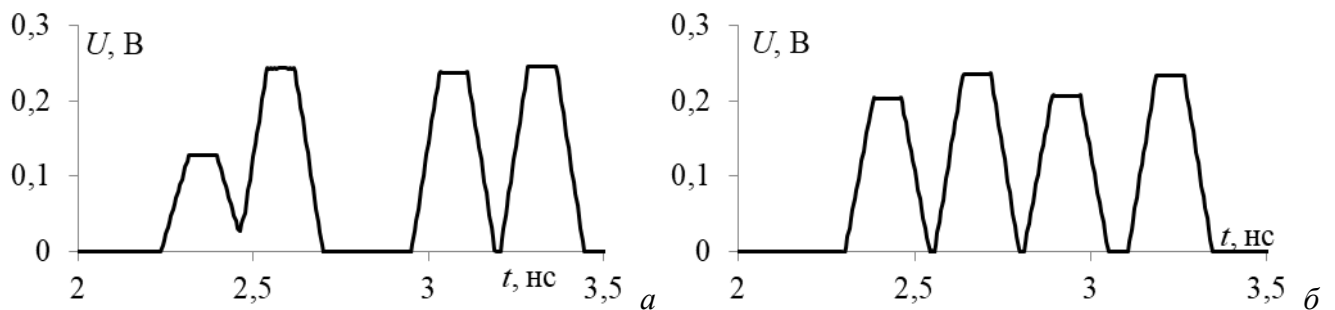


Рисунок 4.38 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника структуры для исходного (а) и оптимального (б) наборов параметров

На рисунке 4.39 представлены зависимости U_{\max} от номера отказа для структур с исходным и оптимальным наборами параметров для вариантов переключения 1, 2, 3.

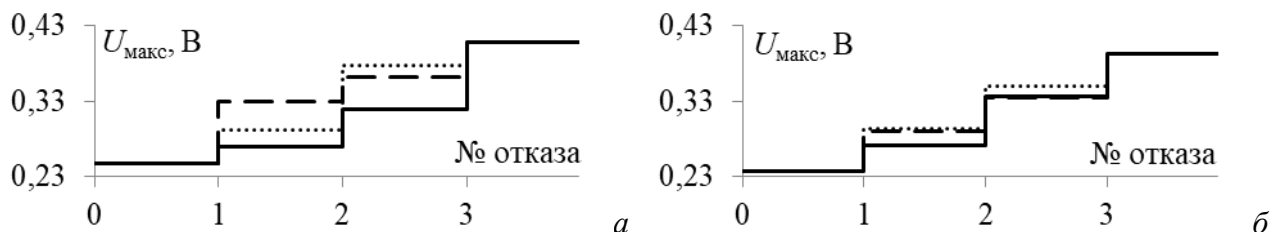


Рисунок 4.39 – Зависимость U_{\max} для вариантов 1 (···), 2 (---), 3 (—) от номера отказа для структуры с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

Из рисунка 4.39а видно, что для вариантов 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,292, 0,33 и 0,27 В, а после отказа 2 до 0,377, 0,362 и 0,32 В, соответственно. После отказа 3 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до уровня 0,409 В, но он не влияет на порядок переключения. Таким образом, для данной структуры оптимален вариант 3, так как значения $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 минимальны из всех вариантов и равны 0,27 и 0,32 В.

Из рисунка 4.39б видно, что для вариантов 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,293, 0,291 и 0,272 В, а после отказа 2 – до 0,35, 0,334 и 0,337 В, соответственно. После отказа 3 наблюдается изменение $U_{\text{макс}}$ до 0,393 В, но данный отказ не влияет на порядок переключения. Таким образом, для данной структуры оптимален вариант 3, так как значения $U_{\text{макс}}$ после отказа 1 минимальны из всех вариантов и равны 0,272 В, а после отказа 2 незначительно больше, чем для варианта 2 и равны 0,337 В.

На рисунке 4.40 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для исходного и оптимального наборов параметров и варианта 3.

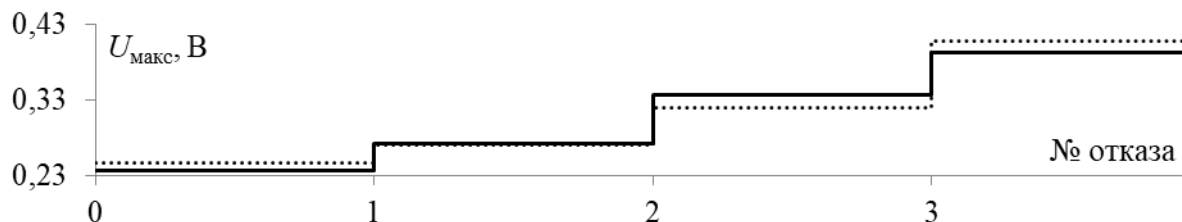


Рисунок 4.40 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при оптимальном варианте 3

порядка переключения для структуры с исходным (···) и оптимальным (—) наборами параметров.

Из рисунка 4.40 видно, что после отказа 1 наблюдается рост $U_{\text{макс}}$ до 0,27 (для исходного набора) и 0,272 В (для оптимального набора), после отказа 2 – до 0,32 и 0,337 В, а после отказа 3 – до 0,409 и 0,393 В, соответственно. Так, у структуры с оптимальным набором значение $U_{\text{макс}}$ после отказа 3 минимально и равно 0,393 В. Однако, если рассматривать отказы 1 и 2, то в этом случае значения $U_{\text{макс}}$ минимальны для структуры с исходным набором и составляют 0,27 и 0,32 В.

На рисунках 4.41, 4.42 и 4.43 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от l_1 при отказах вдоль проводника после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

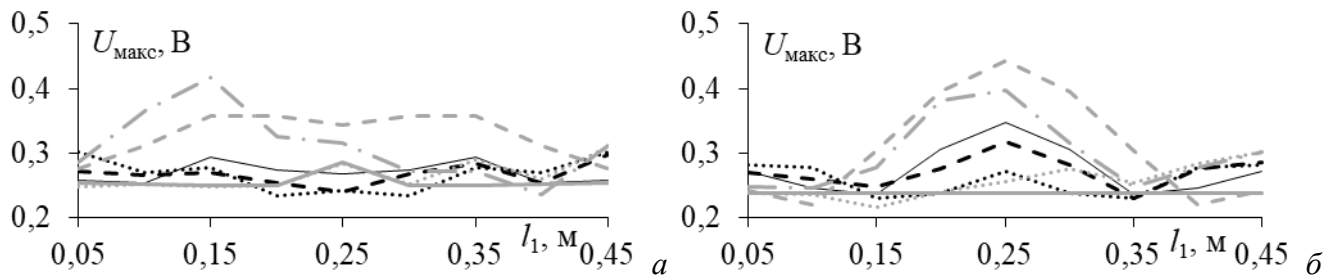


Рисунок 4.41 – Зависимости U_{\max} от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ – XX) (- - -), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на ПЗ (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на ПЗ (- · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 1 структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

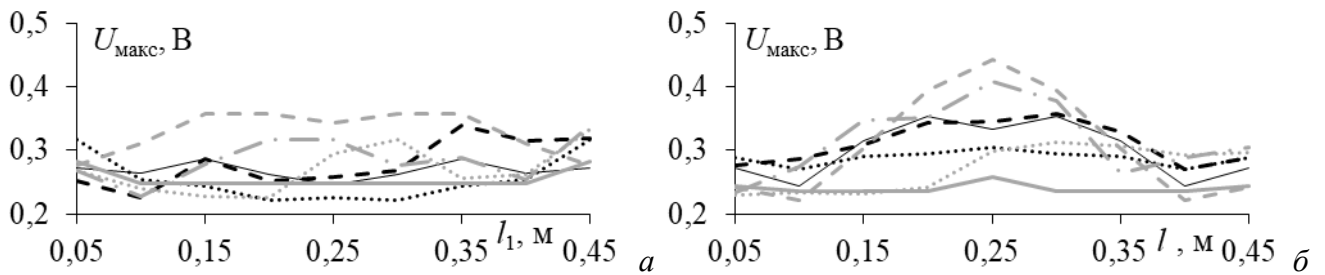


Рисунок 4.42 – Зависимости U_{\max} от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ – XX) (- - -), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 2 структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

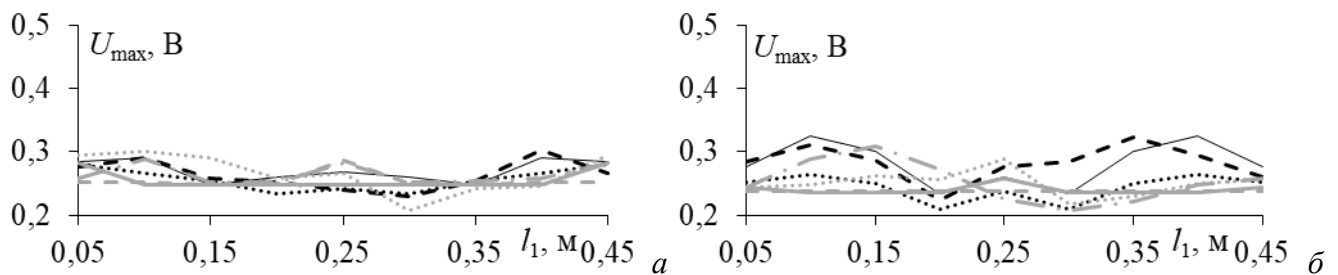


Рисунок 4.43 – Зависимости U_{\max} от l_1 при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ – XX) (- - -), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на ПЗ (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на ПЗ (····) для варианта переключения 3 структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

На рисунке 4.44 представлены зависимости U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 2 вдоль проводника на одном расстоянии от начала ЛП от номера отказа.

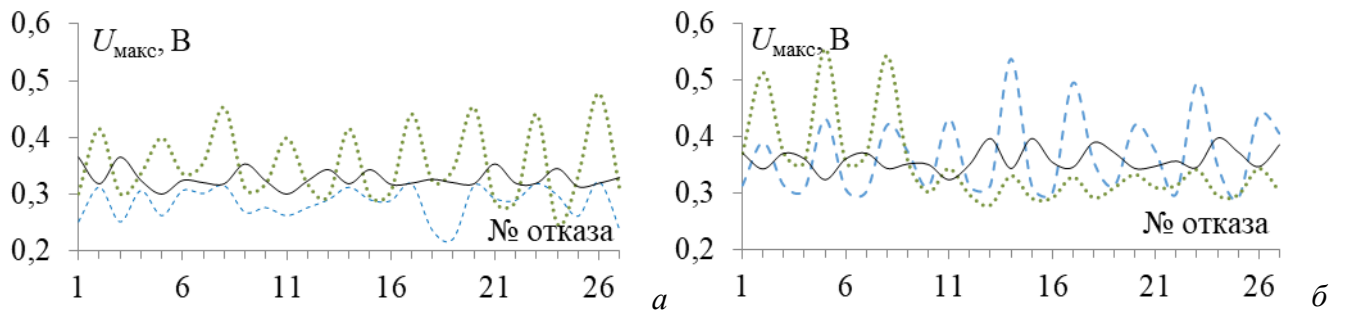


Рисунок 4.44 – Зависимости U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным (а) и оптимизированным (б) наборами параметров после отказа 2 от номера отказа при вариантах переключения 1 (- -), 2 (••) и 3 (—)

Из рисунка 4.44б видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 2 наблюдается изменение U_{\max} до 0,495, 0,506 и 0,411 В. После отказа 2 оптимален вариант переключения 3.

На рисунке 4.45 представлены зависимости U_{\max} для вариантов 1, 2, 3 от номера отказа.

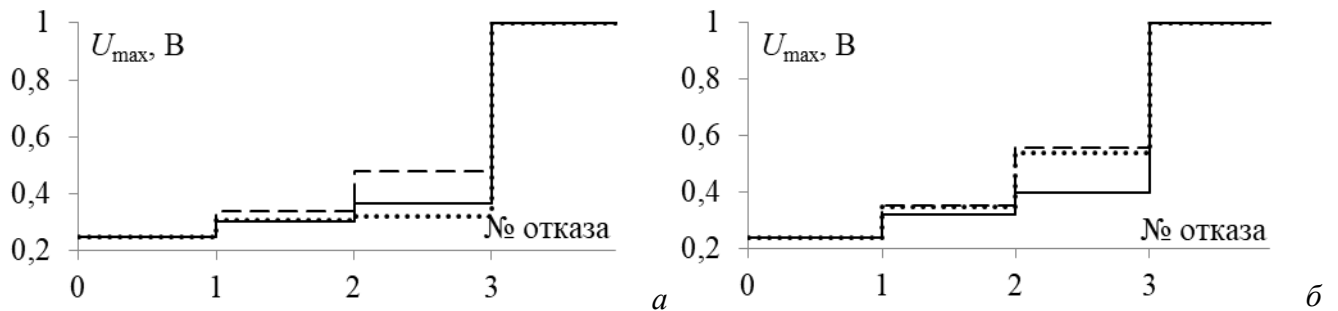


Рисунок 4.45 – Зависимости U_{\max} для вариантов 1 (···), 2 (- -), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и оптимизированными (б) наборами параметров

Из рисунка 4.45а видно, что после отказа 1 наименьшее значение U_{\max} равное 0,3 В будет для варианта 2, а после отказа 2 наименьшее значение $U_{\max}=0,38$ В будет для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров.

Из рисунка 4.45б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения U_{\max} будут у варианта 3. Они равны 0,33 и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения проводников 3.

В таблице 4.16 представлены зависимости U_{\max} для вариантов 1, 2, 3 от номера отказа на конце и вдоль проводников, а также отказов вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом). Видно, что изменение значения U_{\max} для оптимального варианта переключения 3 меньше, чем для вариантов 1 и 2. При этом, U_{\max} для отказов сразу двух проводников входит в диапазон U_{\max} для отказов на конце и вдоль проводников. Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структуры с

оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 на 19 и 72% меньше, чем для наихудшего варианта.

Таблица 4.16 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ для вариантов 1, 2, 3 от номера отказа на конце (—), вдоль проводников (- -) и отказов двух проводников одновременно (---)

Вариант	Исходные параметры	Оптимальные параметры
1		
2		
3		

4.2.5 Основные результаты подраздела

Таким образом, детально исследован оптимальный порядок переключения после отказов на концах проводников трех структур с МР с исходными и оптимальным наборами параметров:

1. Для структуры с опорным проводником в центре, для обоих наборов оптимален вариант переключения 3, а после всех отказов, минимальные значения $U_{\text{макс}}$ получены в структуре с оптимальным набором параметров (0,262, 0,287, 0,334 В), что делает её более предпочтительной.

2. Для структуры с опорным проводником сверху и снизу, после отказов 1, 2 и 3, минимальные значения U_{\max} (0,266, 0,271 и 0,352 В) наблюдаются при исходном наборе параметров. Для исходных и оптимальных наборов параметров оптимален вариант 3.

3. Для структур с опорным проводником в виде боковых полигонов при исходном и оптимальном наборах параметров оптимален вариант переключения 3. У структуры с оптимальным набором параметров значение U_{\max} после отказа 3 при всех вариантах переключения минимально и равно 0,393 В. Однако, если рассматривать отказы 1 и 2, то значения U_{\max} минимальны для исходного набора параметров и составляют 0,27 и 0,32 В. Более предпочтительной может быть структура с исходным набором параметров с минимальными значениями U_{\max} после отказов 1 и 2 (0,27 и 0,32 В).

Также, выполнены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР после отказов вдоль проводников. Практическая значимость этого определяется возможностью учета специфики таких отказов для задания оптимального порядка переключения. Так, для структуры с исполнением опорного проводника в центре с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения U_{\max} после отказов 1 и 2 на 13% и 69% меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника вокруг с оптимизированным набором параметров оптимален вариант 1, поскольку значения U_{\max} после отказов 1 и 2 на 5% и 38% меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу с оптимальным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения U_{\max} после отказов 1 и 2 на 8% и 54% меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения U_{\max} после отказов 1 и 2 на 19% и 72% меньше, чем для наихудшего варианта. Таким образом, выбор оптимального варианта переключения после отказов 1 и 2 для рассмотренных структур позволяет уменьшить максимальное выходное напряжение на 5–72%.

На основе анализа полученных данных можно заключить, что реализация новых устройств с трехкратным МР целесообразна для всех рассмотренных структур. При этом для структур с опорным проводником в центре лучше использовать оптимальный набор параметров, а с опорным проводником сверху и снизу, а также в виде боковых полигонов – исходный. Возможность создания данных структур обоснована реальностью конструктивной и технологической реализаций.

4.3 Экспериментальные исследования структур с трехкратным модальным резервированием

Здесь описаны экспериментальные исследования структур из рисунка 4.1. Данные исследования опубликованы в [127–132]. Сначала рассматриваются экспериментальные исследования прототипов ПП, после отказов их элементов, с исполнением опорных проводников сверху и снизу и в центре, которые были изготовлены заранее. Данные прототипы изготавливались для проверки модального разложения в данных структурах, когда структура согласована с нагрузками. Однако, данные прототипы не рассматривались для случаев с различными граничными условиями на концах пассивных проводников, которые имитируют отказы их элементов. На основе этих экспериментальных исследований впервые разрабатывается прототип ПП с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов.

4.3.1 Прототип печатной платы с исполнением опорных проводников сверху и снизу

Здесь представлены экспериментальные исследования прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника сверху и снизу.

4.3.1.1 Предварительное исследования

Прототип с трехкратным МР представляет собой 4 связанных проводника (2 сверху и 2 снизу), расположенных друг под другом на внутренних слоях четырехслойной ПП, внешние слои которой являются сплошными полигонами схемной земли. На рисунке 4.46 представлен стек прототипа. В качестве основы взят материал Rogers RO3010 с $\epsilon_{r1} = 11,2$ и $\text{tg}\delta_1 = 0,0022$, а препрега – FR-4 с $\epsilon_{r2} = 4,55$ и $\text{tg}\delta_2 = 0,01$. Значения электрофизических параметров для обоих диэлектриков приведены для частоты 1 ГГц. Значения толщин проводников и диэлектриков приведены на рисунке 4.46, при этом ширина проводников $w = 185$ мкм, а расстояние между ними на одном слое $s = 315$ мкм.

На рисунке 4.47а представлен общий вид слоев прототипа. Коаксиально-микрополосковые переходы SMA 3.5 позволяют подключиться к ближнему и дальнему концам резервного и резервируемых проводников. При отказе резервируемой цепи, резервная берет на себя функции резервируемой. При этом к ее ближнему и дальнему концам подключается оборудование в тракте 50 Ом. Номиналы сопротивлений для пассивных проводников задавались с помощью резисторов 50 Ом, 1 ГОм и 1 мкОм. Таким образом, состояние системы после отказа 1 можно записать, например, следующим образом: 50-50 (на ближнем-дальнем концах П1), 50-КЗ (на ближнем-дальнем концах П2), 50-50 (на ближнем-дальнем концах П3),

50-50 (на ближнем-дальнем концах П4). Короткая запись выглядит следующим образом: 50-50, 50-К3, 50-50, 50-50, то есть, на дальнем конце П2 произошёл отказ (К3) и произошло переключение на П1.

Материал	Толщина
Медная фольга	0,035 мм
Препрег FR-4 1080	0,6 мм (h_2)
Медная фольга Rogers RO3010 Медная фольга	0,035 мм (t) 0,13 мм (h_1) 0,035 мм (t)
Препрег FR-4 1080	0,6 мм (h_2)
Медная фольга	0,035 мм (t)

Рисунок 4.46 – Стек прототипа ПП

На рисунке 4.47б представлено поперечное сечение основной структуры с трехкратным МР (ЛП4), длина которой $l = 324$ мм. Рисунки 4.47в и г демонстрируют поперечные сечения вспомогательных участков прототипа от стыков проводников ЛП4 до коаксиально-микрополосковых переходов (отводы до SMA соединителей). При этом длины: ЛП2-1 и ЛП2-2 по 1 мм; ЛП1-1, ЛП1-4, ЛП1-5 и ЛП1-8 по 17 мм; ЛП1-2, ЛП1-3, ЛП1-6 и ЛП1-7 по 18 мм. На рисунке 4.48 представлено фото прототипа.

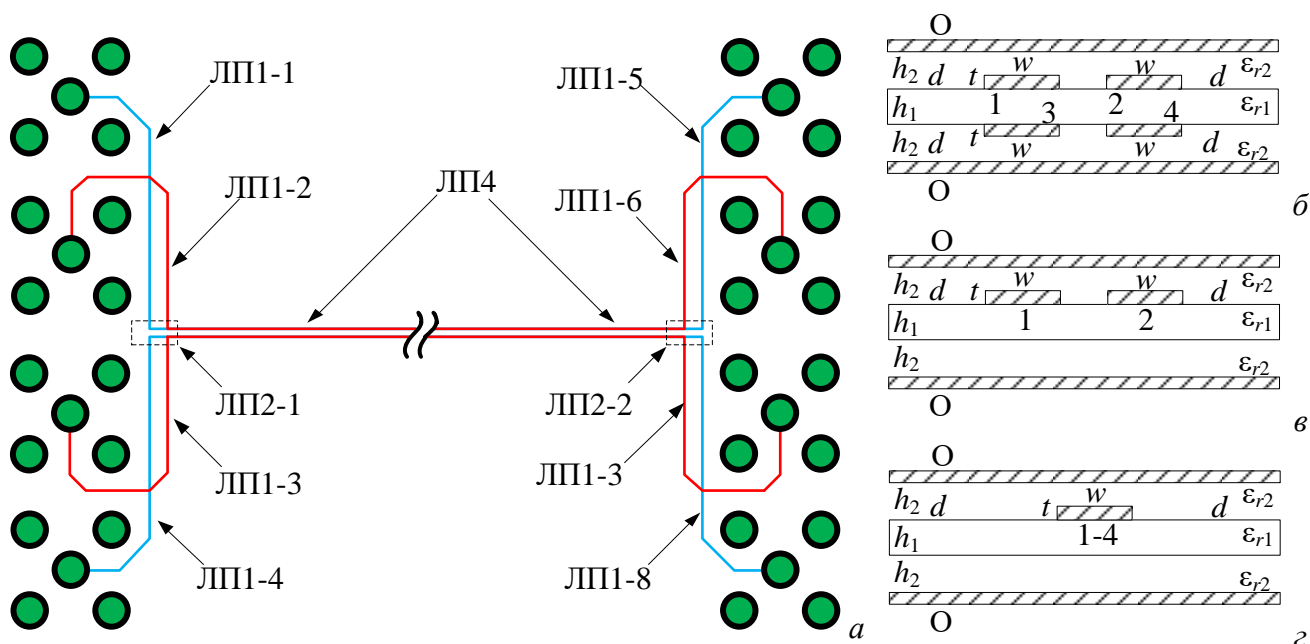


Рисунок 4.47 – Общий вид слоев ПП (а) и поперечные сечения участков с трехкратным МР (б), а также из двух связанных проводников (в) и одиночного проводника (г)



Рисунок 4.48 – Фото прототипа ПП с трехкратным МР

Для предварительного моделирования использовалась система TALGAT. Значения параметров поперечного сечения (рисунок 4.49а) приведены выше, при этом расстояние между торцами проводника и диэлектрика $d=555$ мкм. Для воздействия на исследуемую структуру (рисунок 4.49б) длиной 0,324 м использовался импульс ЭДС амплитудой 2 В общей длительностью 60 пс.

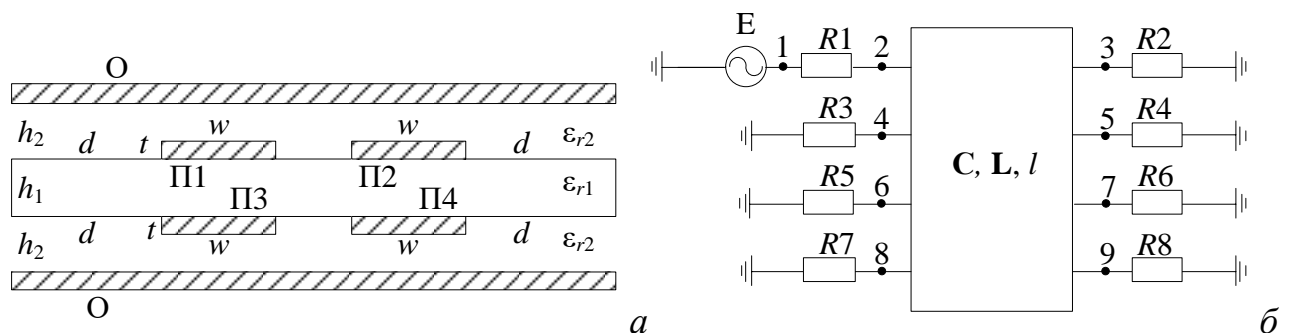


Рисунок 4.49 – Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) структуры с трехкратным МР в системе TALGAT

На рисунке 4.50 приведены формы напряжения на дальнем конце резервируемого проводника (узел 3 на рисунке 4.49б) в структуре с трехкратным МР без учета отводов до SMA соединителей при различных граничных условиях на одном из концов одного из пассивных проводников (П2, П3 и П4). Наблюдается разложение на 4 импульса, амплитуды которых меняются в зависимости от типа отказа. Задержки мод по отклику примерно равны 2,33, 2,51, 3,06 и 3,11 нс.

До отказа, при резисторах 50 Ом на концах всех пассивных проводников, амплитуды импульсов равны: 0,187, 0,242, 0,219, 0,216 В. При отказе компонента (КЗ или ХХ) на одном из концов одного из пассивных проводников, амплитуды импульсов изменяются. При этом, при отказе одного типа на ближнем или дальнем концах пассивного проводника, амплитуды совпадают. Максимальная амплитуда импульсов при КЗ или ХХ на одном из концов пассивного проводника П2 – 2,62 и 2,33 В соответственно, П3 – 2,92 и 3,27 В, П4 – 2,6 и 2,27 В. В таблице 4.17 сведены отклонения амплитуд импульсов при отказе компонента на одном из концов относительно амплитуд до отказов. Для проводников П2, П3 и П4 максимальные отклонения составляют 8,6, 36,9 и 7,7% соответственно. Различия обусловлены тем, что между резервируемым и резервным проводником П3 электромагнитные связи сильнее, чем для П2 и П4, и влияния граничных условий на согласование активного проводника более выражены.

В таблице 4.18 сведены отношения половины ЭДС к максимальному напряжению на дальнем конце резервируемой цепи с трехкратным МР при отказе компонента на одном из концов проводников П2, П3, П4. При этом до отказов, при резисторах на концах пассивных проводников 50 Ом, данное отношение составляет 4,14 раза.

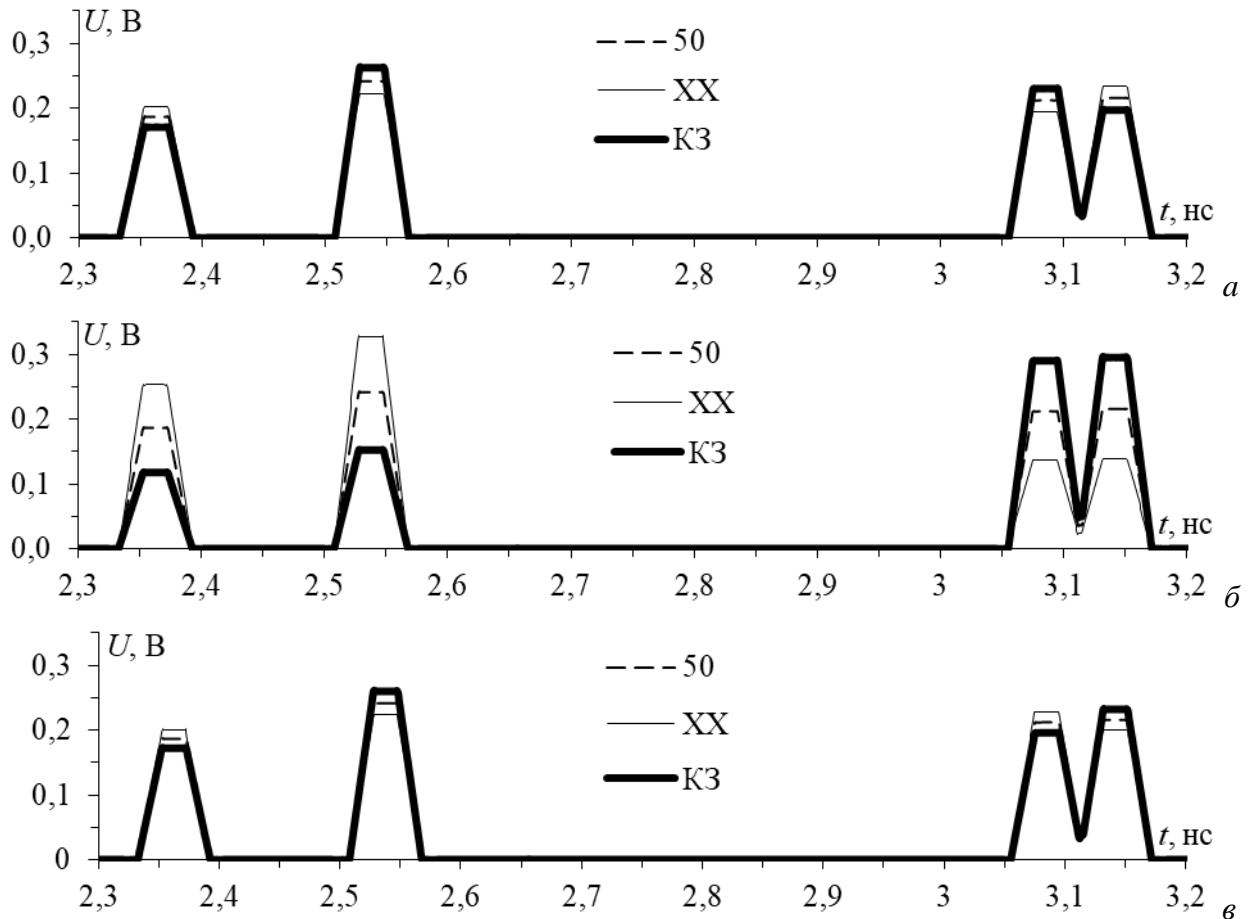


Рисунок 4.50 – Формы напряжения на дальнем конце активного проводника в структуре с трехкратным МР при различных граничных условиях на конце пассивного проводника П2 (а), П3 (б), П4 (в)

Таблица 4.17 – Отклонения (В, %) амплитуд импульсов разложения при отказе на конце одного из проводников, от амплитуд для цепи с трехкратным МР до отказов

Название проводника	№ импульса	Отклонения			
		XX		КЗ	
		В	%	В	%
П2	1	0,015	8,3	-0,017	-8,6
	2	-0,021	-8,3	0,020	8,6
	3	-0,018	-8,3	0,018	8,6
	4	0,018	8,3	-0,019	-8,6
П3	1	0,066	35,6	-0,07	-36,9
	2	0,086	35,6	-0,089	-36,9
	3	-0,075	-35,6	0,078	36,9
	4	-0,077	-35,6	0,076	36,9
П4	1	0,013	7,4	-0,015	-7,7
	2	-0,018	-7,4	0,018	7,7
	3	0,013	7,4	-0,016	-7,7
	4	-0,016	-7,4	0,016	7,7

Таблица 4.18 – Отношение половины ЭДС к максимальному напряжению на дальнем конце цепи с трехкратным МР, для проводников П2, П3, П4

Граничные условия на одном из концов пассивного проводника	П2	П3	П4
XX	4,32	3,05	4,25
КЗ	3,81	3,38	3,84

Таким образом, рассмотрен отказ элементов системы с трехкратным МР на основе тракта 50 Ом. Полагалось, что до отказов цепь в рабочем состоянии, если граничные условия на концах проводников соответствуют 50 Ом, тогда как при отказе одного компонента системы, на одном из концов цепи образуется КЗ или XX. Показано, что после отказа амплитуды импульсов разложения помех могут значительно изменяться. Для трехкратного МР показано, что, чем больше электромагнитная связь между резервируемым и одним из трех проводников с отказом, тем больше отклонение амплитуды импульсов разложения, достигающее 36,5%. Таким образом, при отказе целесообразно переключаться на цепь, электромагнитная связь с которой меньше.

Далее, выполнено тщательное предварительное квазистатическое моделирование для прототипа с учетом отводов. На рисунке 4.51 представлена схема включения исследуемой структуры из рисунка 4.47а в системе TALGAT.

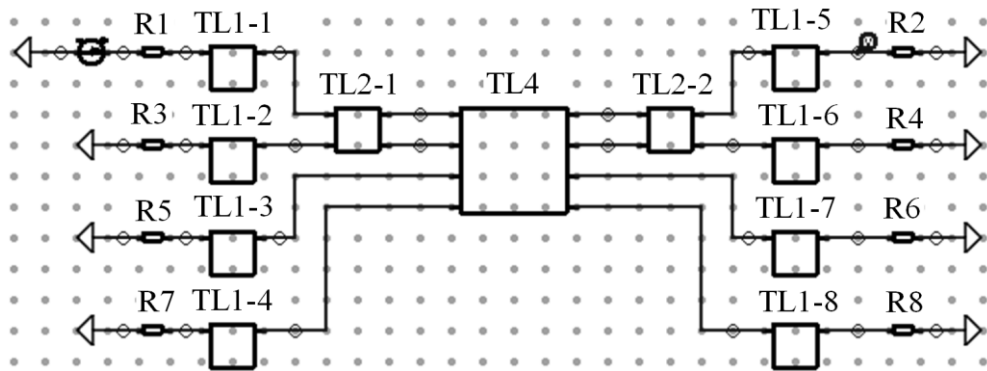


Рисунок 4.51 – Схема включения структуры ПП с трехкратным МР в системе TALGAT

На рисунке 4.52 представлены формы сигнала на дальнем конце структуры до и после отказов без учета потерь. Для примера взяты случаи после второго отказа КЗ-50, 50-50, 50-КЗ и 50-XX, КЗ-50, 50-50, наихудший случай после отказа 3 – 50-XX, КЗ-50, 50-XX, определенный при моделировании. Наблюдаются 4 основных импульса с задержками по уровню 0,1 от U_i (напряжение i -го импульса) равными 2,69, 2,89, 3,48 и 3,53 нс, соответственно. До и после отказов их задержки и амплитуды не меняются. Однако после отказов в активном проводнике наблюдаются импульсы мод, отраженные от XX и КЗ. Эти импульсы приходят с задержкой, соответствующей прохождению моды по двойной длине отвода до SMA соединителей. Небольшое увеличение амплитуды отраженных импульсов до 0,035 В вызвано рассогласованием отводов до SMA соединителей и нагрузок 50 Ом.

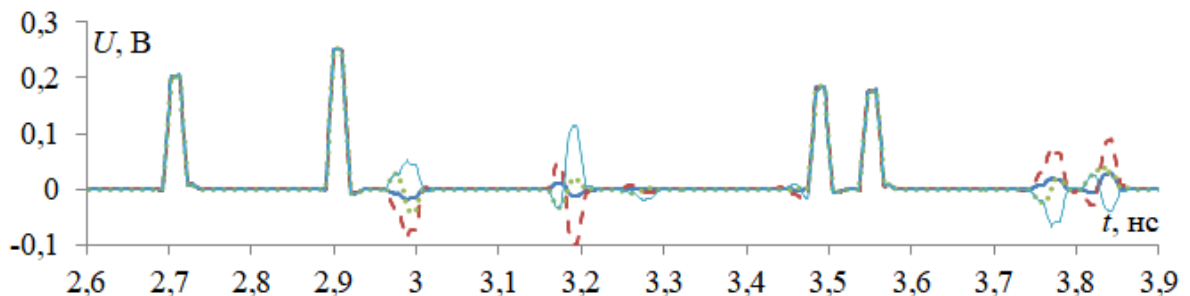


Рисунок 4.52 – Формы напряжения на дальнем конце структуры без учета потерь в проводниках и диэлектриках до отказов (—) и для случаев КЗ-50, 50-50, 50-КЗ (- - -), R-XX, КЗ-50, 50-50 (•••) и 50-XX, КЗ-50, 50-XX (—) после отказов

4.3.1.2 Экспериментальные исследования

Измерены частотные зависимости $|S_{21}|$, $|S_{11}|$, $|S_{12}|$ и $|S_{22}|$ прототипа до отказов в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц. Однако, в дальнейшем рассматривается только $|S_{21}|$ (рисунок 4.53), так как исследуются только защитные характеристики данного устройства. Как видно, структура близка к фильтру нижних частот.

На рисунке 4.54 представлены результаты экспериментального исследования во временной области, демонстрирующие распространение трапецеидального импульса общей

длительностью 150 пс с ЭДС 2 В. На дальнем конце структуры с МР наблюдаются 3 импульса с $U_{\text{макс}}=159$ мВ, что в 6,3 раза меньше, чем амплитуда СШП импульса на ближнем конце структуры. Импульсы 3 и 4 из рисунка 4.54 накладываются друг на друга, так как минимально возможная длительность импульса, определяемая возможностями измерительного оборудования, не позволяет подать сигнал, у которого частотный спектр шире 18 ГГц.

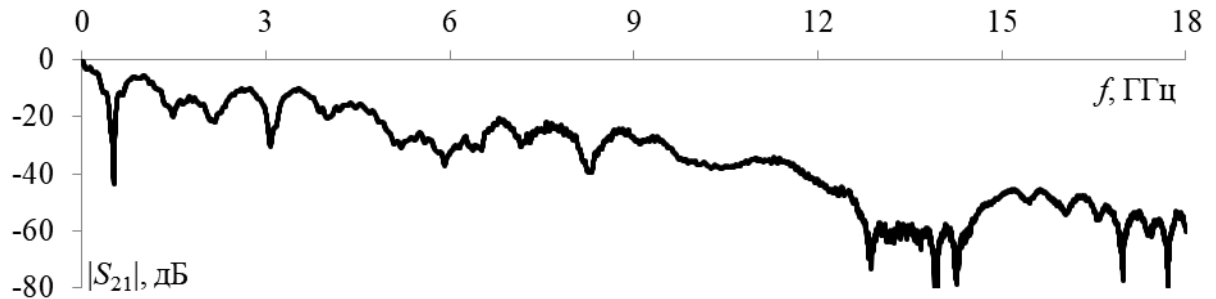


Рисунок 4.53 – Измеренная частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц прототипа до отказов

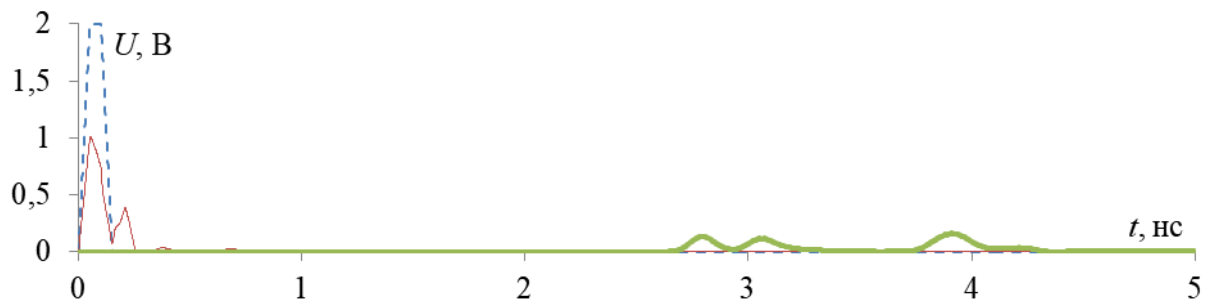


Рисунок 4.54 – Формы ЭДС источника (---) и напряжения на ближнем (—) и дальнем (—) концах прототипа до отказов

В таблицу 4.19 сведены значения $U_{\text{макс}}$ для всех случаев после отказов. После отказа 1 (типов КЗ или ХХ) возможны три варианта переключения, которые между собой не пересекаются. Для каждого из них определяющим является случай с наибольшим $U_{\text{макс}}$. Например, для вариантов 1, 2 и 3 после отказа 1 эти случаи следующие: 50-ХХ, 50-50, 50-50, и 50-50, 50-ХХ, 50-50, и 50-50, 50-50, 50-ХХ, соответственно. А после отказа 2 – 50-ХХ, КЗ-50, 50-50, и 50-50, 50-ХХ, ХХ-50 или 50-50, 50-КЗ, 50-ХХ, и КЗ-50, 50-50, 50-КЗ. После отказа 3 все варианты сводятся к одному, где наибольшее значение $U_{\text{макс}}$ наблюдается у 50-ХХ, КЗ-50, 50-ХХ.

Видно, что наихудшим (КЗ-50, 50-50, 50-КЗ) из определяющих является случай, который на 8,18% больше случая до отказов. Он наблюдается для одного из 62 вариантов после отказов, тогда как остальные варианты держатся на уровне примерно на 1,26% больше варианта до отказов.

Таблица 4.19 – Значение $U_{\text{макс}}$ в конце активного проводника после различных вариантов отказов для структуры с МР

Вариант	После отказа 1	$U_{\text{макс}}$, мВ	Вариант	После отказа 2	$U_{\text{макс}}$, мВ	После отказа 3	$U_{\text{макс}}$, мВ
1	50-XX, 50-50, 50-50	157	1	50-XX, 50-XX, 50-50	156	50-XX, 50-XX, 50-XX	152
				50-XX, XX-50, 50-50	155	50-XX, XX-50, 50-XX	156
				50-XX, 50-K3, 50-50	157	50-XX, K3-50, 50-XX	158
				50-XX, K3-50, 50-50	158	50-K3, 50-K3, 50-XX	157
						50-K3, K3-50, 50-XX	152
	50-K3, 50-50, 50-50	154		50-K3, 50-K3, 50-50	152	50-K3, 50-XX, 50-XX	150
				50-K3, K3-50, 50-50	151	50-K3, XX-50, 50-XX	157
				50-K3, 50-XX, 50-50	154	50-XX, 50-XX, 50-K3	151
						50-XX, XX-50, 50-K3	152
						50-XX, 50-K3, 50-K3	154
2	50-50, 50-XX, 50-50	160	2	50-50, 50-XX, 50-XX	157	50-XX, K3-50, 50-K3	151
				50-50, 50-XX, XX-50	163	50-K3, 50-K3, 50-K3	153
				50-50, 50-XX, 50-K3	162	50-K3, K3-50, 50-K3	158
				50-50, 50-XX, K3-50	159	50-K3, 50-XX, 50-K3	151
						50-K3, XX-50, 50-K3	152
	50-50, 50-K3, 50-50	158		50-50, 50-K3, 50-K3	159	50-XX, 50-XX, K3-50	154
				50-50, 50-K3, K3-50	157	50-XX, XX-50, K3-50	157
				50-50, 50-K3, 50-XX	163	50-XX, 50-K3, K3-50	155
						50-XX, K3-50, K3-50	157
						50-K3, 50-K3, K3-50	152
3	50-50, 50-50, 50-XX	161	3	50-XX, 50-50, 50-XX	156	50-K3, K3-50, K3-50	150
				XX-50, 50-50, 50-XX	155	50-K3, 50-XX, K3-50	156
				50-K3, 50-50, 50-XX	155	50-K3, XX-50, K3-50	158
				K3-50, 50-50, 50-XX	157	50-XX, 50-XX, XX-50	152
						50-XX, XX-50, XX-50	154
	50-50, 50-50, 50-K3	158		50-K3, 50-50, 50-K3	151	50-XX, 50-K3, XX-50	157
						50-XX, K3-50, XX-50	155
				K3-50, 50-50, 50-K3	174	50-K3, 50-K3, XX-50	157
				50-XX, 50-50, 50-K3	157	50-K3, K3-50, XX-50	152
				XX-50, 50-50, 50-K3	158	50-K3, 50-XX, XX-50	150
		50-K3, XX-50, XX-50	156				

В таблицу 4.20 сведены частотные отклики (до 1 ГГц) и формы напряжения на дальнем конце структуры после отказов для определяющих случаев в сравнении с откликом до отказов. После отказа 1 наибольшие изменения частотных откликов и форм напряжения наблюдаются для вариантов 1 (50-XX, 50-50, 50-50) и 3 (50-50, 50-50, 50-XX), соответственно, так как первая частота резонанса (f_0) смещается примерно на 7,7%, а значение $U_{\text{макс}}$ увеличивается на 1,24%, относительно варианта до отказов. После отказа 2 наибольшие изменения частотных откликов и форм напряжения наблюдаются для варианта 3, так как f_0 смещается примерно на 25%, а $U_{\text{макс}}$ – увеличивается на 8,18 %. После отказа 3 значение f_0 смещается примерно на 27%, а

значение U_{\max} приходит к уровню до отказов. В формах импульсов наблюдаются отраженные импульсы.

Таблица 4.20 – Частотные и временные отклики на дальнем конце структуры после отказов (---) для вариантов переключения в сравнении с откликами до отказов (—)

Отказ	Вариант	Частотные отклики	Формы напряжений
1	1 50-XX, 50-50, 50-50		
	2 50-50, 50-XX, 50-50		
	3 50-50, 50-50, 50-XX		
2	1 50-XX, K3-50, 50-50		
	2 50-50, 50-K3, 50-XX		
	3 K3-50, 50-50, 50-K3		
3	— 50-XX, K3-50, 50-XX		

В таблицу 4.21 сведены зависимости N -норм от отказов, их значения, а также подробные описания зависимостей. Видно, что после отказов нормы изменяются неравномерно. Например, норма N_1 (U_{\max} на дальнем конце структуры), которая определяет вероятность сбоя схемы /

электрического пробоя / дуговых эффектов, для вариантов 2 и 3 больше, чем после отказа 1. Это объясняется уникальной комбинацией отраженных импульсов от нагрузок пассивных проводников. Тем же объясняются значения U_{\max} для варианта 1 после отказов 1 и 2, которые меньше, чем до отказов. Сравнены измеренные и вычисленные характеристики во временной и частотных областях для случаев до (50-50, 50-50, 50-50) и после (для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX) отказов. Взят именно этот случай после отказов, так как для него наблюдаются наибольшие отклонения в частотной и временной областях, описанные выше.

Таблица 4.21 – N -нормы до и после отказов на одном из концов резервируемого проводника для вариантов переключения 1 (••••), 2 (- - -) и 3 (—)

Зависимости	Варианты	Отказы			
		0	1	2	3
	1	0,159	0,157	0,158	0,159
	2		0,160	0,163	
	3		0,161	0,174	
	1	1,774	1,774	1,773	1,77
	2		1,775	1,767	
	3		1,77	1,77	
	1	79,59	81,51	82,29	81,33
	2		77,88	79,38	
	3		79,08	91,76	
	1	79,63	98,56	99,4	97,58
	2		81	81,26	
	3		81,45	100	
	1	2,64	2,81	2,83	2,83

Все значения N_2 далее по тексту в 10^9 степени. До отказов $N_2=1,774$. Для варианта 1 после отказов 1 и 2 N_2 практически не изменяется. Для варианта 2 после отказа 1 значение N_2 практически не изменяется, а после отказа 2 – уменьшается на 0,39%. Для варианта 3 N_2 после

отказов уменьшается на 0,22%. Таким образом, вероятность искрения компонента или сбоя схемы для всех вариантов практически не изменяется.

Все значения N_3 далее по тексту в 10^{-12} степени. До отказов $N_3=79,59$. Для варианта 1 после отказов 1 и 2 N_3 увеличивается на 2,41 и 3,39% от случая до отказов, соответственно. Для варианта 2 после отказа 1 N_3 уменьшается на 2,14%, а после отказа 2 – возвращается почти к прежним значениям. Для варианта 3 после отказа 1 N_3 практически не изменяется, а после отказа 2 – увеличивается на 15,3%. После отказа 3 для вариантов 1, 2 и 3 N_3 увеличивается на 2,18%. Таким образом, вероятность диэлектрического пробоя для варианта 2 меньше, чем для 1 и 3.

Все значения N_4 далее по тексту в 10^{-12} степени. До отказов $N_4=79,63$. Для варианта 1 после отказов 1 и 2 N_4 увеличивается на 23,77 и 24,8% от случая до отказов, соответственно. Для варианта 2 после отказов 1 и 2 N_4 увеличивается на 1,7%. Для варианта 3 после отказов 1 и 2 N_4 увеличивается на 2,28 и 25,58%, соответственно. После отказа 3 для вариантов 1, 2 и 3 N_4 увеличивается на 22,5% от уровня до отказов. Таким образом, вероятность повреждения оборудования для варианта 2 меньше, чем для 1 и 3.

Все значения N_5 далее по тексту в 10^{-6} степени. До отказов $N_5=2,64$. Для варианта 1 после отказов 1 и 2 N_5 увеличивается на 6,44 и 7,2 % от случая до отказов, соответственно. Для варианта 2 после отказов 1 и 2 N_5 увеличивается на 0,7 и 1%, а после отказа 3 – на 7,2%. Для варианта 3 уровни почти такие же, как для варианта 3, но после отказа 2 уровень гораздо выше (на 11,7% от уровня до отказов) Таким образом, вероятность выгорания компонента для варианта 2 меньше, чем для 1 и 3.

Таким образом, выполнено экспериментальное исследование прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников сверху и снизу. До отказов наблюдается ослабление импульса помехи в 6,3 раза. После отказов, на активный проводник влияют отражения от нагрузок на пассивных проводниках, за счет чего значение $U_{\text{макс}}$ меняется. Максимальное увеличение $U_{\text{макс}}$ после отказов (всего для одного варианта КЗ-50, 50-50, 50-КЗ) достигает 8% от случая до отказов. В основном, изменения остаются на уровне 1,2% от случая до отказов. Это объясняется наличием отводов до SMA соединителей, в которых отраженные импульсы приходят с задержкой и таким образом практически не накладываются на основные импульсы.

Исходя из анализа N -норм, можно заключить, что, в целом, оптимален вариант переключения 2, то есть для него вероятность отказов компонента меньше, чем у других. Так, N_1 лишь для варианта 1 после отказов 1 и 2, меньше, чем для вариантов 2 и 3, N_2 для всех вариантов практически не отличается (максимальное отличие достигает 0,39%), тогда как N_3 , N_4 и N_5 для варианта 2 после отказов 1 и 2, меньше, чем для вариантов 1 и 3.

4.3.1.3 Сравнение результатов измерений и моделирования прототипа

На рисунке 4.55 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне частот от 10 МГц до 1 ГГц для структуры с МР до и после отказов (для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX), полученные при эксперименте и электродинамическом моделировании. Отличия f_0 между моделированием и экспериментом для случаев 50-50, 50-50, 50-50 и 50-XX, КЗ-50, 50-XX составили 4,5 и 1,3 %, соответственно.

На рисунке 4.56 представлены формы напряжения на дальнем конце этой структуры для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. Для рисунка 4.56а значения $U_{\text{макс}}$ составили 159 и 169 мВ, а 4.56б – 169 и 167 мВ, соответственно. Таким образом, различия $U_{\text{макс}}$ для эксперимента и электродинамического моделирования составили 3 и 0,5%, соответственно. Задержки первого импульса для рисунка 4.56а и б при эксперименте и электродинамическом моделировании не отличаются и равны (по уровню 0,5 от амплитуды импульса) по 2,71 нс, а для третьего – 3,8 и 3,68%, соответственно.

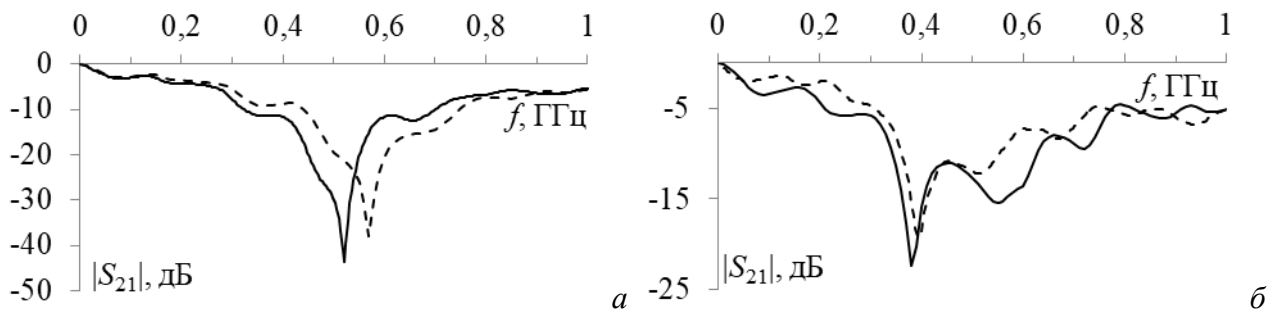


Рисунок 4.55 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 1 ГГц прототипа до (а) и после отказов для варианта 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (- -)

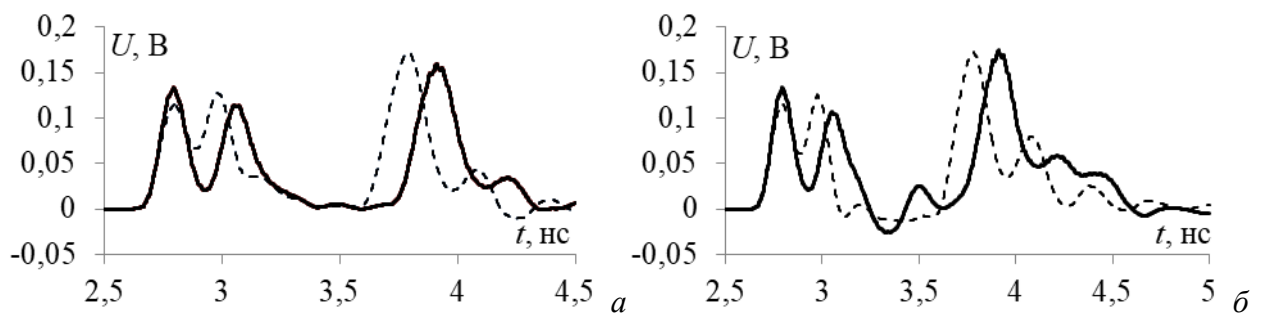


Рисунок 4.56 – Формы напряжения на дальнем конце структуры до отказов (а) и для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX после отказов (б) при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (- - -)

Таким образом, приведенное исследование показало хорошую согласованность результатов моделирования и эксперимента во временной и частотной областях. Максимальные отличия $U_{\text{макс}}$ и задержек на 3 и 1,6%, соответственно, показывают, что результаты

экспериментальных исследований могут незначительно не совпадать с ожидаемыми, что необходимо учитывать при проектировании реальной аппаратуры с МР.

4.3.2 Прототип печатной платы с исполнением опорного проводника в центре

Здесь представлены экспериментальные исследования прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в центре [59].

4.3.2.1 Конструкция прототипа

Для измерения создан прототип. Поперечное сечение его регулярной части представлено на рисунке 4.57. Структура представляет собой четырехслойную ПП, где первый проводник (П1) – резервируемый, а второй, третий и четвертый (П2, П3, П4) – резервные. Проводники П1 – П4 трассируются на внешних слоях, а опорные (О) – на внутренних. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 4.22. В качестве материала подложки использовался FR-4 с $\epsilon_r=4,55$ и $\text{tg}\delta=0,01$. На рисунке 4.58 представлена фотография прототипа. К ближнему и дальнему концам активного проводника подключены SMA соединители, а пассивных – нагрузки в виде SMD резисторов типоразмера 1206. Таким образом, в данном прототипе минимизирована длина отводов до нагрузок у пассивных проводников.

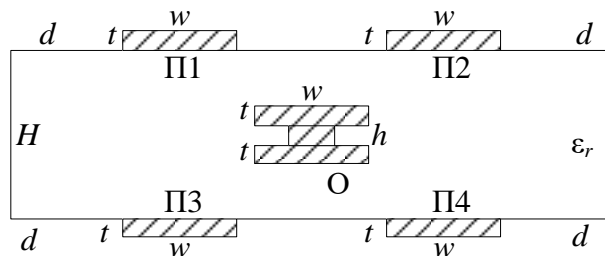


Рисунок 4.57 – Регулярная часть прототипа с исполнением опорного проводника в центре

Таблица 4.22 – Параметры поперечного сечения прототипа с исполнением опорного проводника в центре

Параметр	l , м	w , мм	d , мм	H , мкм	h , мкм	t , мкм	ϵ_r	s , мкм
Значение	1	1	5	922	510	35	4,5	700



Рисунок 4.58 – Фотография прототипа с исполнением опорного проводника в центре

4.3.2.2 Результаты эксперимента

Здесь представлены результаты экспериментальных исследований прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в центре.

В таблице 4.23 представлены граничные условия до и после отказов, которые задавались в ходе моделирования. Номера 1, 2, 5 и 8 соответствуют варианту порядка переключения 1, номера 1, 3, 6 и 8 – варианту 2, а номера 1, 4, 7 и 8 – варианту 3. На рисунках 4.59 и 4.60 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для случаев до и после отказов. В таблицу 4.23 сведены характеристики в частотной области.

Таблица 4.23 – Граничные условия до и после отказов и характеристики в частотной области

№	Граничные условия	f_0 , ГГц	$ S_{21} $, дБ
1	50-50, 50-50, 50-50	0,66	-17,39
2	R-XX, 50-50, 50-50	0,78	-19,96
3	50-50, 50-K3, 50-50	1,709	-22,9
4	50-50, 50-50, 50-K3	0,70965	-22,72
5	50-XX, K3-50, 50-50	0,709	-26,5
6	50-50, 50-K3, K3-50	1,24	-28,82
7	50-K3, 50-50, 50-K3	0,809	-29,34
8	50-XX, K3-50, 50-K3	0,809	-27,64

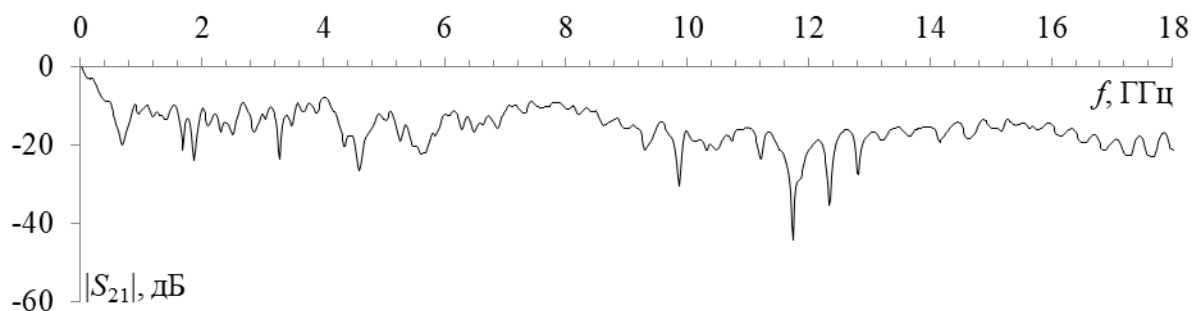


Рисунок 4.59 – Частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц прототипа до отказов

Видно, что максимальное значение f_0 проявляется при варианте 3, тогда как минимальное – при варианте 1. Разница между ними составляет 44%. Ослабление максимально при варианте 7 и равно 29,34 дБ, а минимально при варианте 1 и равно 17,39 дБ. Разница между ними составляет 12 дБ. На рисунке 4.61 представлены формы напряжения (на вход подавался трапециевидный импульс общей длительностью 240 пс с амплитудой ЭДС 2 В) на ближнем и дальнем концах прототипа до отказов. На рисунке 4.62 представлены формы напряжения на дальнем конце прототипа после отказов для вариантов переключения 1, 2 и 3.

Из рисунка 4.61 видно, что амплитуда напряжения на ближнем конце приблизительно равна половине амплитуды ЭДС. На дальнем конце наблюдается разложение на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,0877$ В. Таким образом, $U_{\text{макс}}$ до отказов меньше, чем напряжение на ближнем конце в 11,36 раз. Из рисунка 4.62 видно, что формы напряжения до и после отказов почти совпадают, а разница по амплитуде составляет 2,76%. Наибольшее $U_{\text{макс}}=0,0932$ В наблюдается для граничных условий – 50-50, 50-K3, K3-50 (№6, таблица 4.23).

Результаты эксперимента показывают, что формы импульсов разложения в данном случае для вариантов до и после отказов практически не отличаются. Это отчасти объясняется большой длиной структуры и потерями в ЛП. Все отклики для случаев до и после отказов сглаживаются.

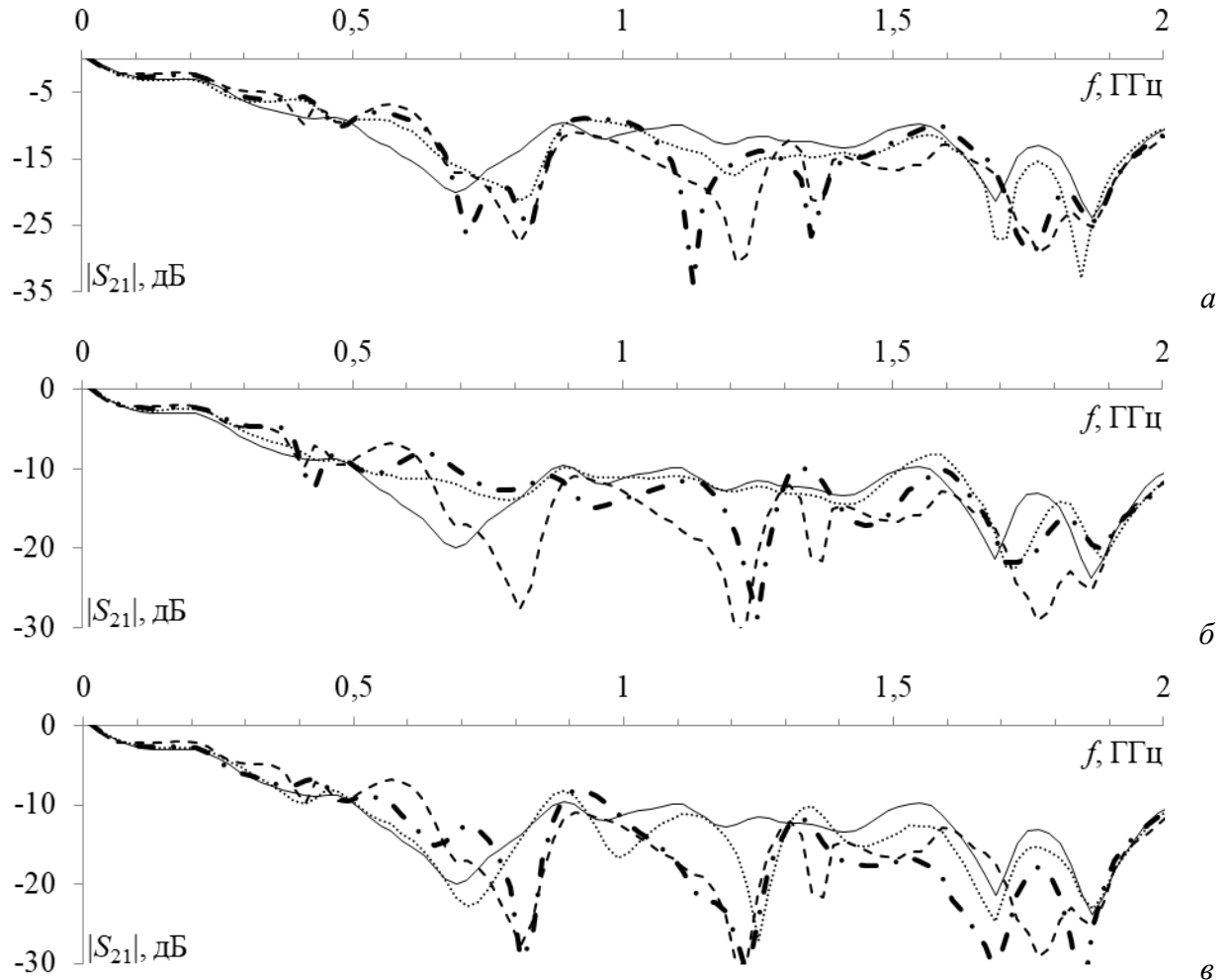


Рисунок 4.60 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ для случаев:

1 (—), 2 (...), 5 (-•-), 8 (---) (а); 1 (—), 3 (...), 6 (-•-), 8 (---) (б); 1 (—), 4 (...), 7 (-•-), 8 (---) (в)

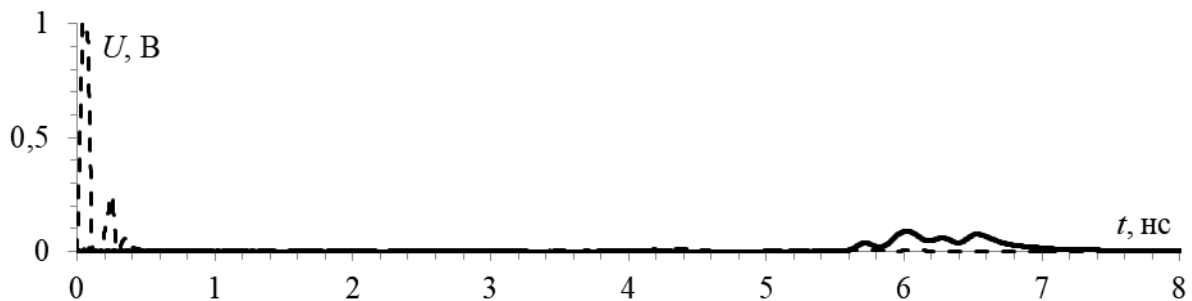


Рисунок 4.61 – Формы напряжения на ближнем (---) и дальнем (—) концах прототипа до отказов

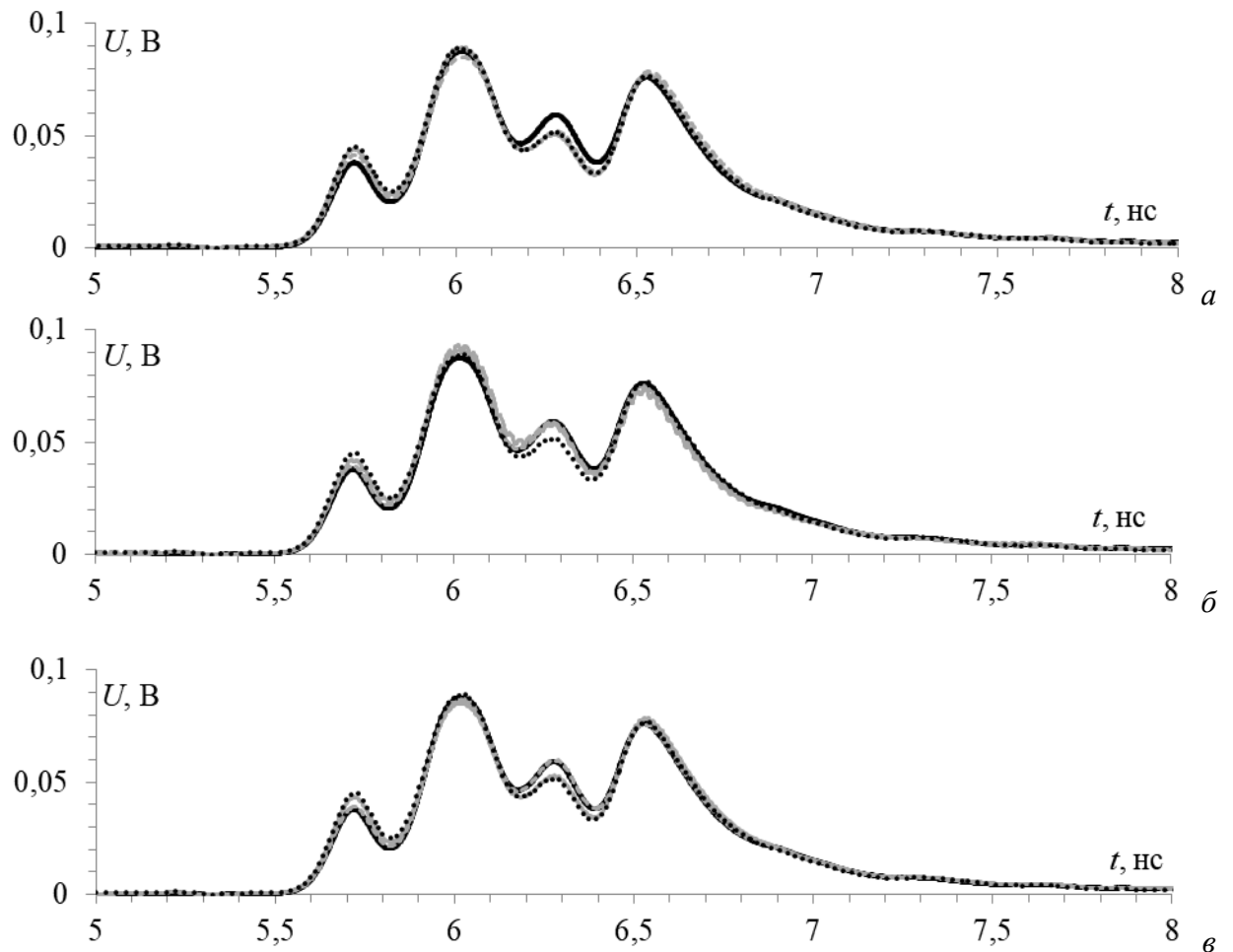


Рисунок 4.62 – Формы напряжения на дальнем конце прототипа для граничных условий:

1 (—), 2 (---), 5 (-), 8 (...) (а); 1 (—), 3 (---), 6 (-), 8 (...) (б); 1 (—), 4 (---), 7 (-), 8 (...) (в)

4.3.2.3 Сравнение результатов вычислений и измерений прототипа

Сравнены результаты экспериментальных исследований и электродинамического моделирования во временной и частотной областях до и после отказов. После отказов взят вариант – 50-XX, КЗ-50, 50-XX, так как для него наблюдаются наибольшие отклонения в частотной и временной областях, описанные выше. Электродинамическое моделирование выполнено в системе EMPro. Для этого использован метод моментов, в ходе работы которого решаются уравнения Максвелла без каких-либо упрощений, через комплексные матрицы погонных параметров.

На рисунке 4.63 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 2 ГГц. Отличия f_0 между моделированием и экспериментом для случаев до и после отказов составили 16,67 и 13,79%, соответственно.

На рисунке 4.64 представлены формы напряжения на дальнем конце прототипа для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. Видны 4 импульса разложения, которые накладываются друг на друга. Для рисунка 4.64а $U_{\text{макс}}=87,65, 80,237$ мВ, а для рисунка 4.64б $U_{\text{макс}}=89,366, 85,89$ мВ, соответственно. Таким

образом, различия $U_{\text{макс}}$ для эксперимента и электродинамического моделирования составили 8,47 и 3,9%, соответственно. Задержки первого импульса для рисунка 4.64 *а* и *б* при эксперименте и моделировании отличаются незначительно: они равны (по уровню 0,5 от амплитуды импульса) до отказов 5,542 и 5,5812 нс (разница 0,7%), а после отказов – 5,53 и 5,59 нс (разница 1,07%).

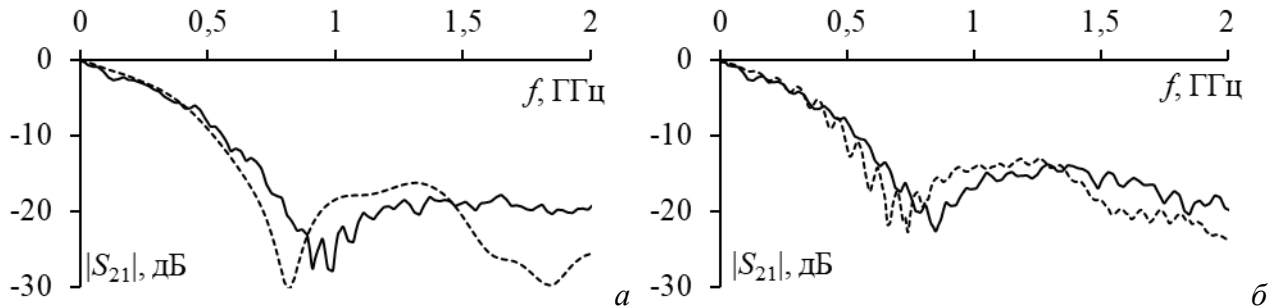


Рисунок 4.63 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 10 ГГц для прототипа до (*а*) и после отказов для варианта 50-XX, КЗ-50, 50-XX (*б*) при эксперименте (—) и электродинамическом анализе (---)

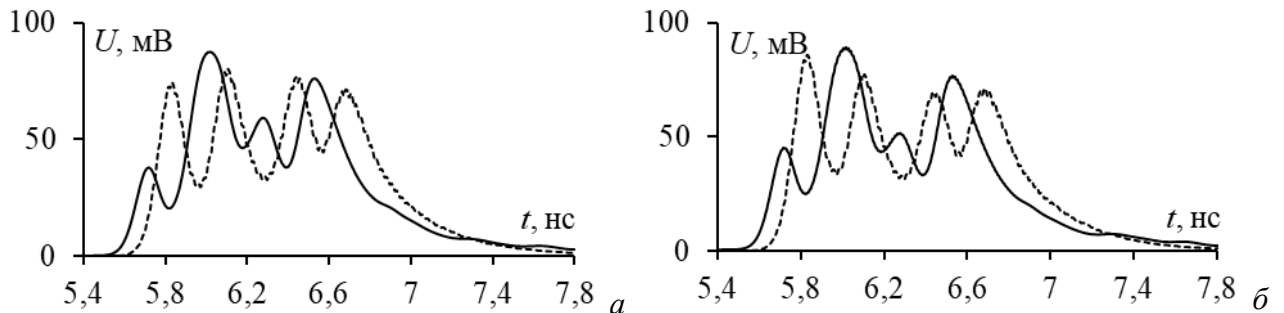


Рисунок 4.64 – Формы напряжения на дальнем конце структуры 1 до отказов (*а*) и после отказов для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX (*б*) при эксперименте (—) и электродинамическом (---) моделировании

Таким образом, исследование показало хорошую согласованность результатов моделирования и эксперимента во временной и частотной областях. Максимальные отличия $U_{\text{макс}}$ и задержек первых импульсов составляют 8,47 и 1,07%, соответственно.

4.3.3 Разработка и экспериментальные исследования прототипов печатной платы с опорным проводником в виде боковых полигонов

Предыдущие экспериментальные исследования прототипов ПП с исполнением опорных проводников сверху и снизу, а также в центре, показали, что представленные предварительные результаты в подразделе 4.1 не подтверждаются данными эксперимента. Так, для прототипа ПП с исполнением опорного проводника в центре, $U_{\text{макс}}$ изменяется всего на 2,76% для случаев до и после отказов (рассматривался самый худший случай). При этом были большие потери в диэлектрике, так как использовался материал FR-4 с $\text{tg}\delta=0,01$, а длина ЛП составляла 1 м. На

прототипе ПП с исполнением опорного проводника сверху и снизу выявлено, что на выходные характеристики очень сильно влияют отводы от регулярной части до SMA соединителей.

С учетом этих экспериментальных исследований впервые разработан прототип ПП с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов. Взят материал FSD1020T с $\text{tg}\delta = 0,003$, так минимизируются потери в ЛП. Прототип изготовлен в трех реализациях, которые отличаются отводами. Прототип 1 – на концах пассивных проводников установлены SMD-резисторы, минимизированы отводы на пассивных проводниках. Прототип 2 – на концах пассивных проводников установлены SMA соединители поверхностного монтажа, отводы длиной по 6 мм расположены друг под другом. Прототип 3 – на концах пассивных проводников установлены SMA соединители, длины отводов равны 31 мм. Таким образом, выполняется экспериментальная оценка изменения $U_{\text{макс}}$ после отказов. Кроме того, экспериментально определен оптимальный порядок переключения для трех прототипов ПП с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов.

4.3.3.1 Многокритериальная оптимизация структуры с опорным проводником в виде боковых полигонов

Оптимизация структуры проводилась эвристическим поиском по двум критериям: максимизации $\Delta t_{\text{мин}}$ и согласование с трактом 50 Ом. На рисунке 4.65 представлено поперечное сечение структуры с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов. В таблице 4.24 сведены исходные параметры поперечного сечения структуры.

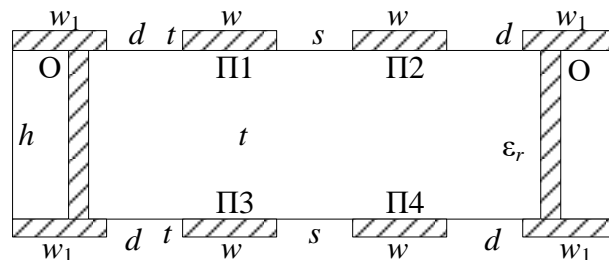


Рисунок 4.65 – Регулярная часть прототипа структуры ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов

Таблица 4.24 – Исходные параметры поперечного сечения структуры

l , м	w , мкм	s , мкм	d , мкм	h , мкм	t , мкм	w_1 , мкм	ϵ_r
0,3	200	200	200	254	35	2000	10,2

На вход структуры подавалось импульсное воздействие в форме трапеции общей длительностью 90 пс и амплитудой ЭДС 2 В. На рисунке 4.66 представлены формы сигналов на ближнем и дальнем концах структуры. На ближнем конце наблюдается импульс с амплитудой 1 В, что является половиной амплитуды ЭДС, поэтому структура считается согласованной. На дальнем конце наблюдается разложение на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,22$ В и $\Delta t_{\text{мин}}=110$ пс. На рисунке 4.67 приведены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при вариантах переключения 1, 2

и 3. После отказа 3 наибольшее $U_{\text{макс}}=0,39$ В наблюдается у варианта 50-XX, КЗ-50, 50-КЗ. Отличие $U_{\text{макс}}$ до и после отказов достигает 27%.

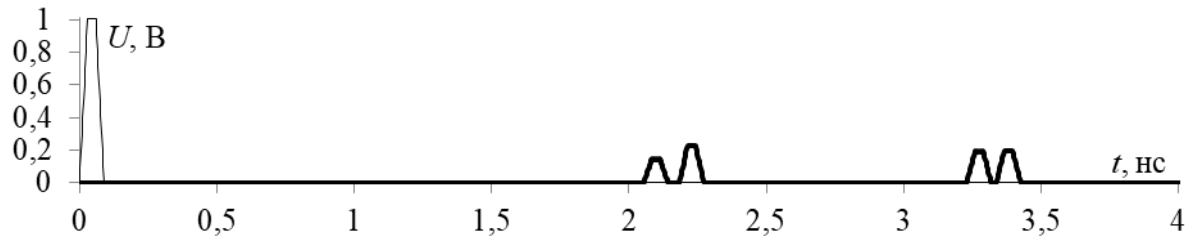


Рисунок 4.66 – Формы напряжения на ближнем (—) и дальнем (—) концах структуры

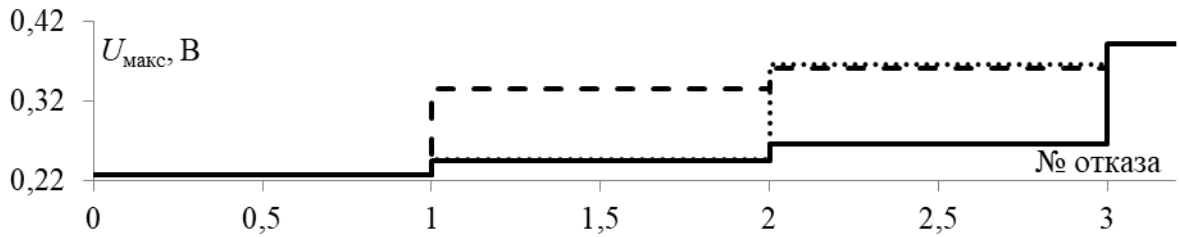


Рисунок 4.67 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при вариантах переключения 1 (···), 2 (- -) и 3 (—)

На рисунке 4.68 представлены зависимости задержек импульсов t_i на дальнем конце структуры от геометрических параметров w , s и d . На рисунке 4.69 представлены зависимости $\Delta\tau_{\text{мин}}$ и амплитуды напряжения U на ближнем конце от w , s и d . В таблицу 4.25 сведены зависимости амплитуд импульсов U_1 , U_2 , U_3 и U_4 на дальнем конце от d , w и s до и после отказов. После отказов рассматривается самый худший случай, при котором $U_{\text{макс}}$ максимально и соответствует напряжению импульса U_2 . С ростом s , $\Delta\tau_{\text{мин}}$ будет уменьшаться, также будет уменьшаться U_2 после отказов. Таким образом, s надо минимизировать. С ростом d до 700 мкм $\Delta\tau_{\text{мин}}$ достигает 943 пс/м далее и остается стабильным. При $w=420$ мкм $\Delta\tau_{\text{мин}}$ перестает увеличиваться. Поэтому, контролируя параметры d от 700 до 1000 мкм, а w от 300 до 500 мкм, на ближнем конце получалось $U=1$ В (половина ЭДС). В таблицу 4.26 сведены оптимальные параметры структуры.

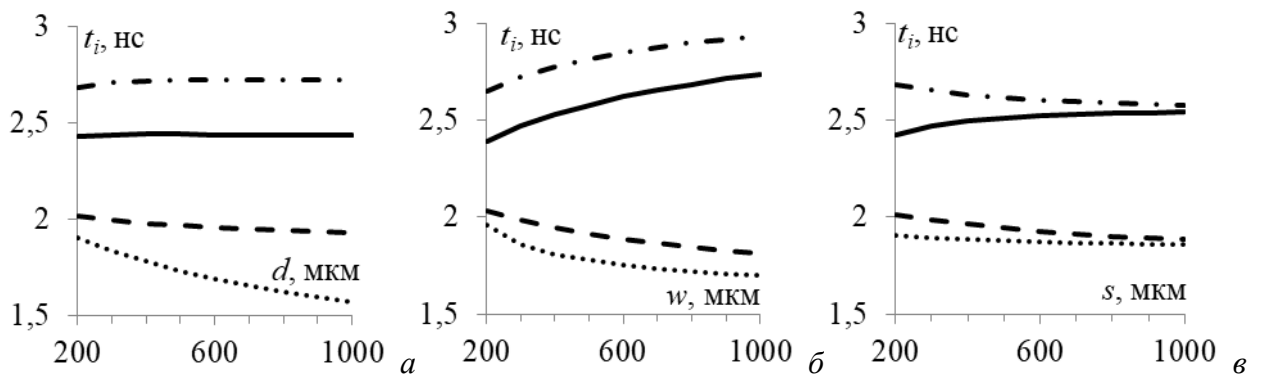


Рисунок 4.68 – Зависимости задержек t_1 (···), t_2 (- -), t_3 (—) и t_4 (-·-·) от d (а), w (б) и s (в)

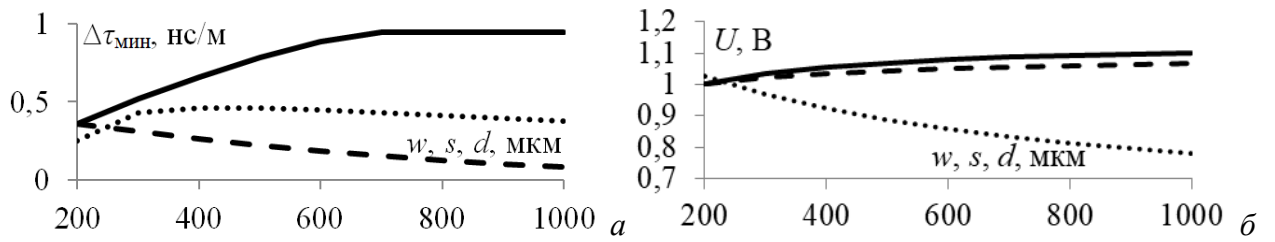
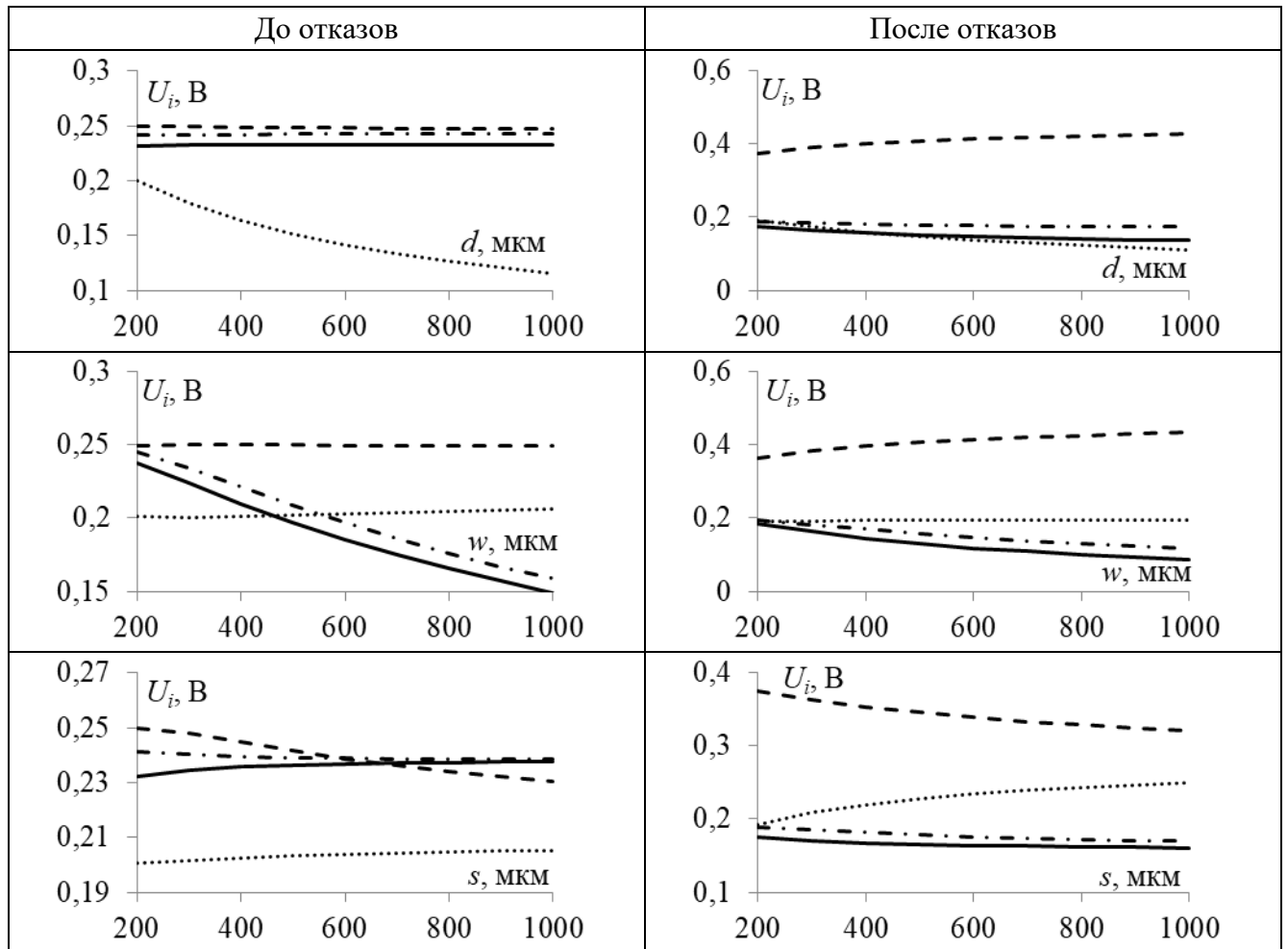
Рисунок 4.69 – Зависимости $\Delta\tau_{\min}(a)$ и $U(b)$ от w (•••), s (- -) и d (—)Таблица 4.25 – Зависимости амплитуд напряжения импульсов U_1 (••), U_2 (- -), U_3 (—) и U_4 (-•-) на дальнем конце от d , w и s до и после отказов

Таблица 4.26 – Оптимальные параметры поперечного сечения структуры

l , м	w , МКМ	s , МКМ	d , МКМ	h , МКМ	t , МКМ	w_1 , МКМ	ε_r
0,2	390	175	800	254	35	2000	10,2

На рисунке 4.70 представлены формы напряжения на ближнем и дальнем концах структуры длиной 0,2 м. Видно, что структура согласована по половине ЭДС, а также $\Delta t_{\min}=202$ пс. На рисунке 4.71 приведены зависимости U_{\max} от номера отказа при вариантах переключения 1, 2 и 3. После отказа 3 наибольшее $U_{\max}=0,456$ В наблюдается у варианта 50-XX, КЗ-50, 50-КЗ. Отличие U_{\max} до отказов при сравнении со значением после отказов достигает 29%.

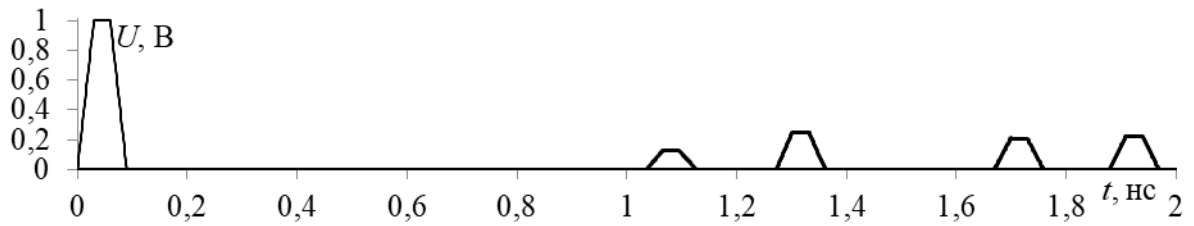


Рисунок 4.70 – Формы напряжения на ближнем (–) и дальнем (—) концах структуры

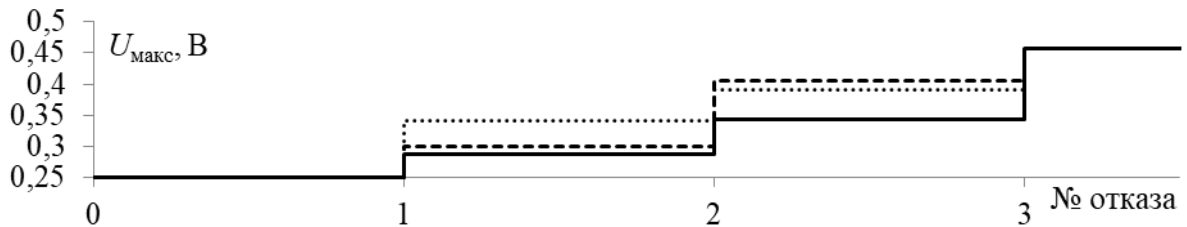


Рисунок 4.71 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа при вариантах переключения 1 (···), 2 (- - -) и 3 (—)

4.3.3.2 Разработка топологии и изготовление прототипов печатных плат с многократным модальным резервированием

Здесь представлены прототипы ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов. Параметры поперечного сечения прототипов представлены в таблице 4.27. В качестве материала подложки использовался FSD1020T с параметрами: диэлектрическая прочность – 22 кВ/мм, $\text{tg}\delta$ – 0,003, теплопроводность λ – 0,68 Вт/(м²·К), ϵ_r – 10,2±0,05.

Таблица 4.27 – Параметры поперечного сечения прототипов

l , м	w , мкм	s , мкм	d , мкм	h , мкм	t , мкм	w_1 , мкм	ϵ_r
0,2	390	175	800	254	35	2000	10,2

При создании прототипов важно учитывать длину отводов от отрезка структуры до SMA-соединителей или резисторов, т.к. отводы могут существенно изменять характеристики ПП с МР. Разработаны 3 прототипа. Прототип 1 – на концах пассивных проводников установлены SMD-резисторы, минимизированы отводы на пассивных проводниках. Прототип 2 – на концах пассивных проводников установлены SMA соединители поверхностного монтажа, отводы длиной по 6 мм расположены друг под другом. Прототип 3 – на концах пассивных проводников установлены SMA соединители, длины отводов равны 31 мм. Фрагменты фотошаблонов прототипов ПП представлены на рисунках 4.72–4.74 (вид сверху и снизу).

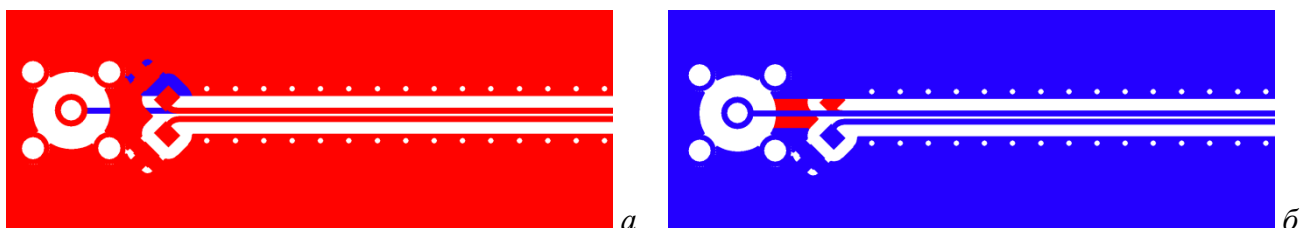


Рисунок 4.72 – Часть прототипа 1: виды сверху (а) и снизу (б)

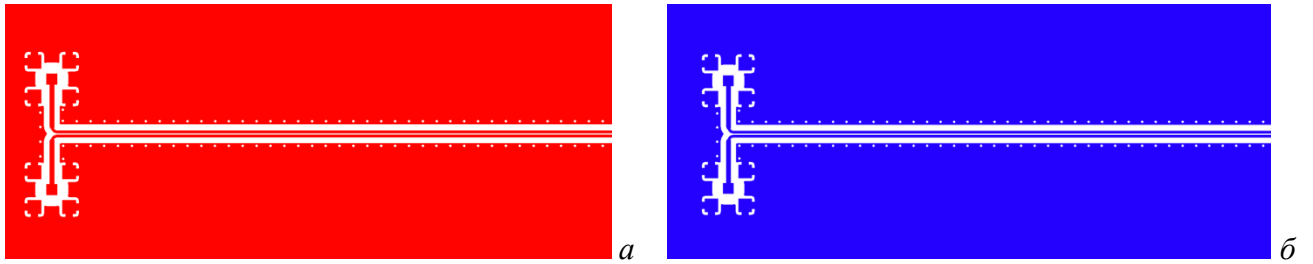


Рисунок 4.73 – Часть прототипа 2: виды сверху (а) и снизу (б)

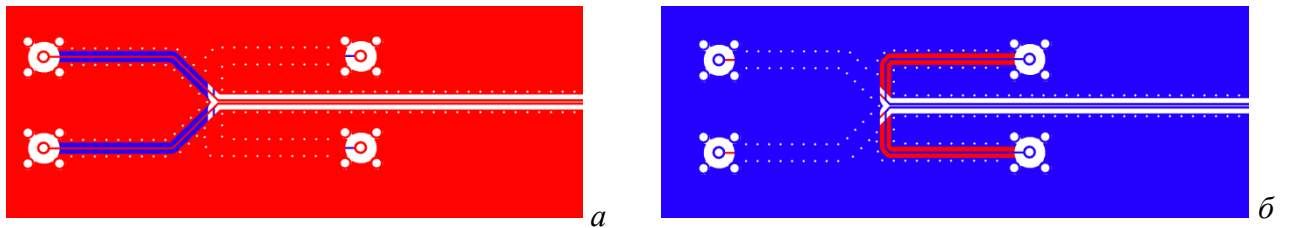


Рисунок 4.74 – Часть прототипа 3: виды сверху (а) и снизу (б)

На рисунке 4.75 представлены поперечные сечения отводов для прототипов 2 и 3, где для прототипа 2 $w=620$ мкм, $d=800$ мкм (рисунок 4.73), а для прототипа 3 $w=290$ мкм, $d=800$ мкм (рисунок 4.74б). Выполнялось согласование отводов с трактом 50 Ом.

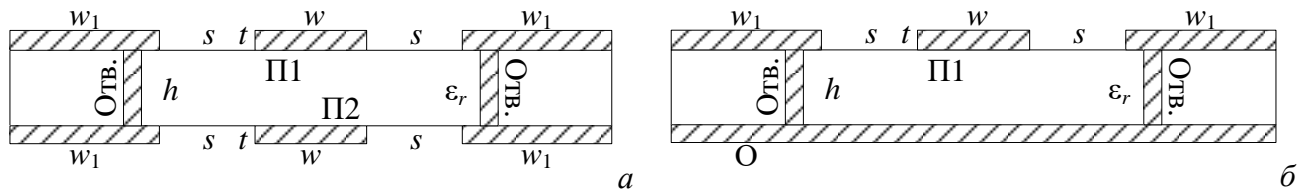


Рисунок 4.75 – Поперечные сечения отводов для прототипов 2 (а) и 3 (б)

На рисунке 4.76 представлена изготовленная ПП с прототипами с трехкратным МР с опорным проводником в виде боковых полигонов. На рисунках 4.77–4.79 представлены прототипы 1, 2 и 3 с установленными компонентами, соответственно.

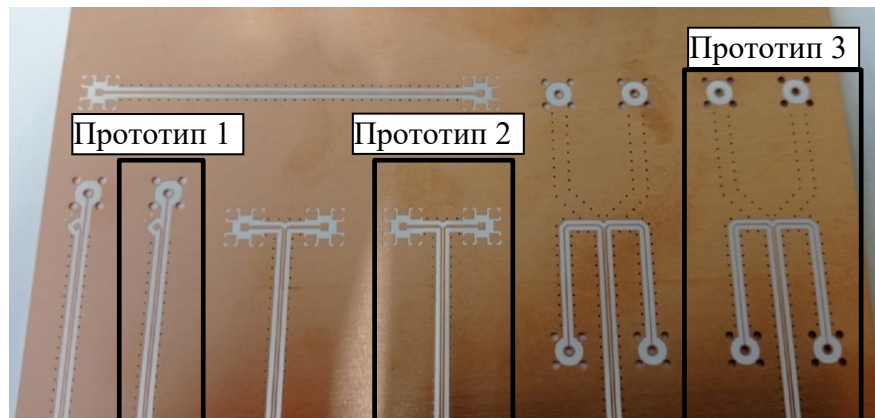


Рисунок 4.76 – Часть изготовленной ПП с прототипами 1, 2 и 3

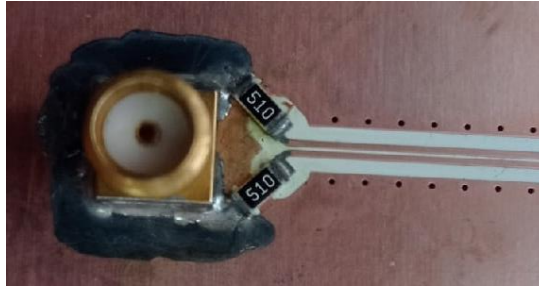


Рисунок 4.77 – Часть изготовленного прототипа 1

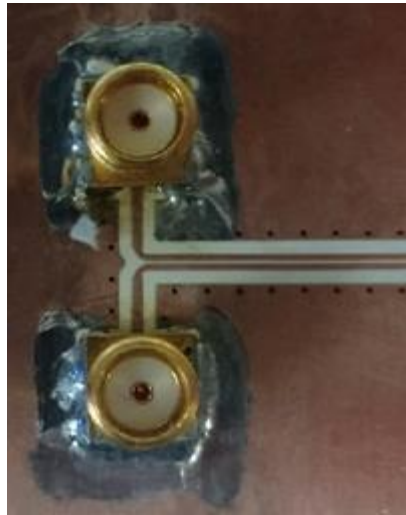


Рисунок 4.78 – Часть изготовленного прототипа 2

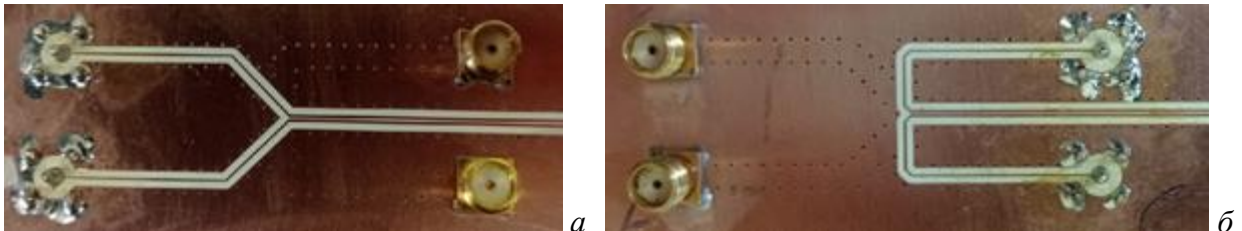


Рисунок 4.79 – Часть изготовленного прототипа 3: виды сверху (а) и снизу (б)

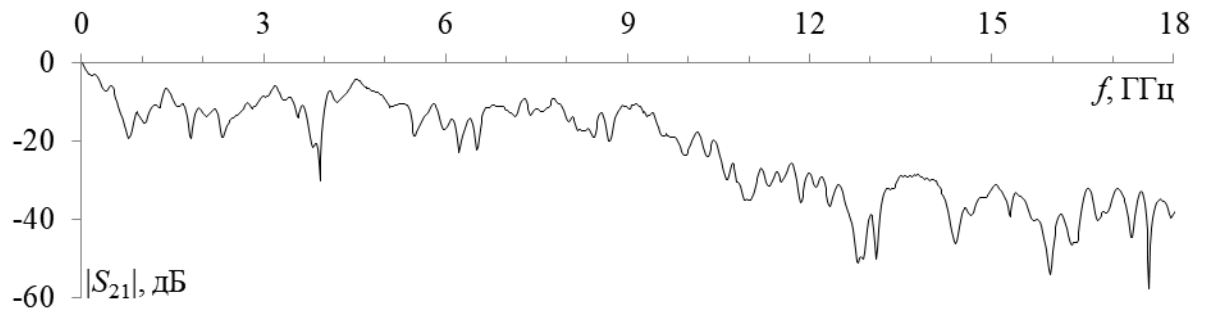
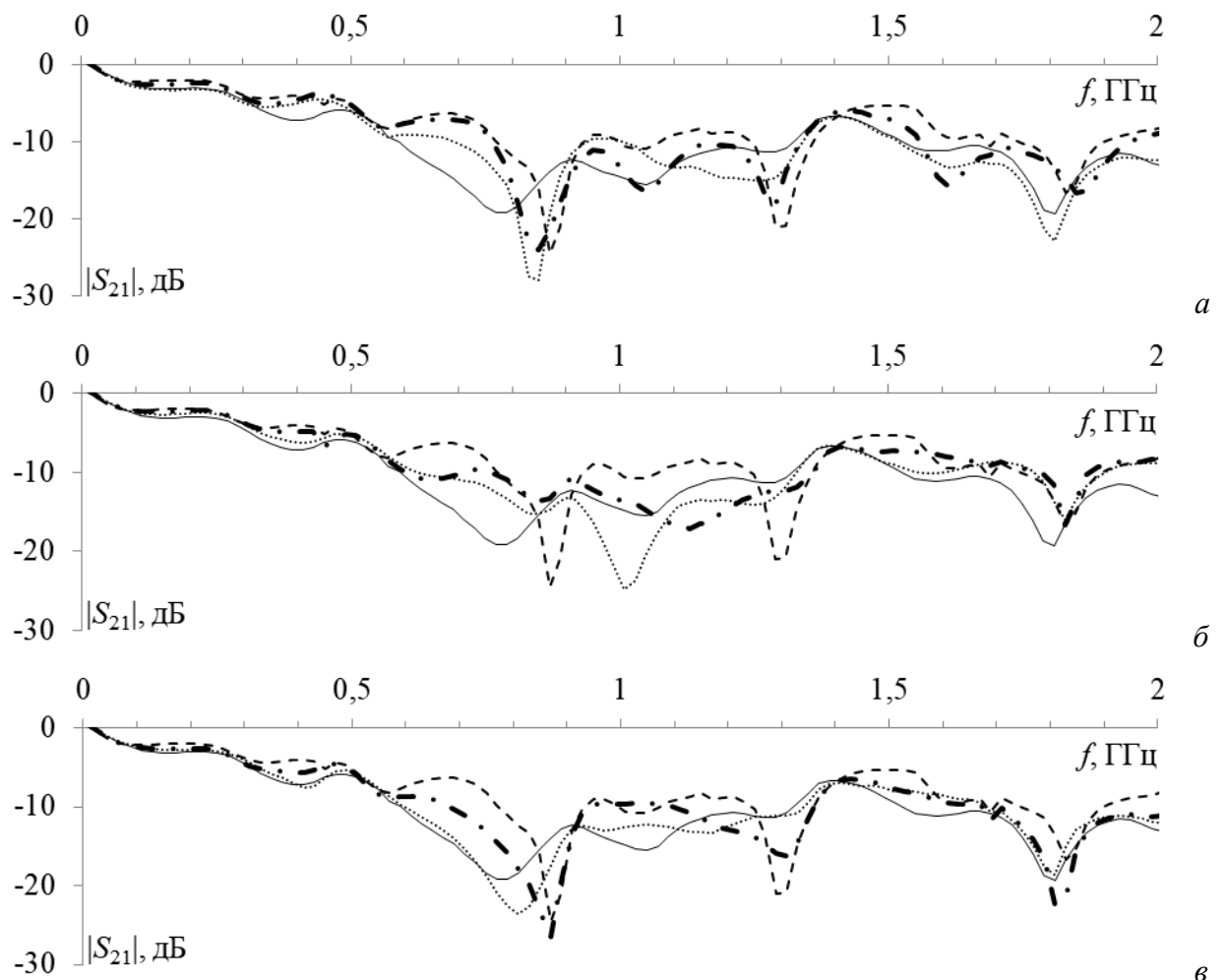
Далее представлены результаты экспериментальных исследований трех прототипов ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов.

4.3.3.3 Результаты экспериментальных исследований прототипа 1

В таблице 4.28 представлены граничные условия до и после отказов, которые задавались при моделировании регулярной части прототипа. Номера 1, 2, 5 и 8 соответствуют варианту порядка переключения 1, номера 1, 3, 6 и 8 – варианту 2, номера 1, 4, 7 и 8 – варианту 3. На рисунках 4.80 и 4.81 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для вариантов до и после отказов. В таблице 4.28 сведены характеристики прототипа 1 в частотной области.

Таблица 4.28 – Варианты граничных условий до и после отказов и значения параметров

№ варианта	Граничные условия	f_0 , ГГц	$ S_{21} $, дБ
1	50-50, 50-50, 50-50	0,76	-19,11
2	50-XX, 50-50, 50-50	0,84	-27,85
3	50-50, 50-К3, 50-50	1,0095	-24,811
4	50-50, 50-50, 50-К3	0,8096	-23,49
5	50-XX, К3-50, 50-50	0,849	-24,48
6	50-50, 50-К3, К3-50	1,12	-17,14
7	50-XX, 50-50, 50-К3	0,869	-26,377
8	50-XX, К3-50, 50-К3	0,869	-24,48

Рисунок 4.80 – Частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц для прототипа 1 до отказовРисунок 4.81 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипа 1 с граничными условиями:

1 (—), 2 (…), 5 (-•-), 8 (---) (а); 1 (—), 3 (…), 6 (-•-), 8 (---) (б); 1 (—), 4 (…), 7 (-•-), 8 (---) (в)

Видно, что наибольшее значение f_0 наблюдается при граничных условиях 6 (таблица 4.28) и равно 1,12 ГГц, тогда как минимальное – при варианте 1 и равно 0,76 ГГц. Разница между ними составляет 19,14%. Максимальное ослабление наблюдается при условиях 2 и равно 27,85 дБ, тогда как минимальное – при варианте 6 и равно 17,14 дБ. Разница между ними составляет 10,7 дБ.

На рисунке 4.82 представлены формы напряжения на ближнем и дальнем концах до отказов (на вход структуры подавался трапецевидный импульс общей длительностью 120 пс с амплитудой ЭДС 2 В). На рисунке 4.83 представлены формы напряжения на дальнем конце после отказов для вариантов, которые соответствуют порядкам переключения 1, 2 и 3 при сигнале общей длительностью 120 пс.

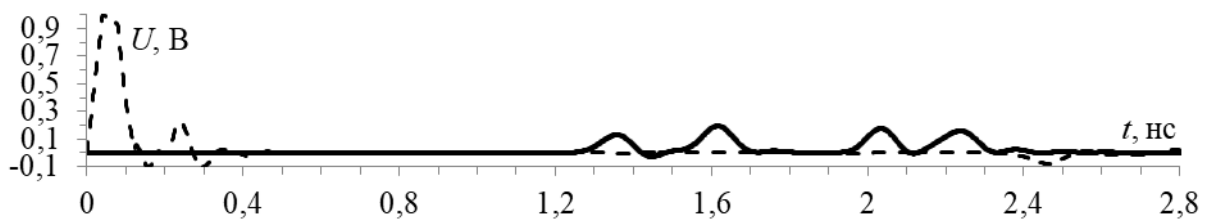


Рисунок 4.82 – Формы напряжения на ближнем (---) и дальнем (—) концах прототипа 1 до отказов

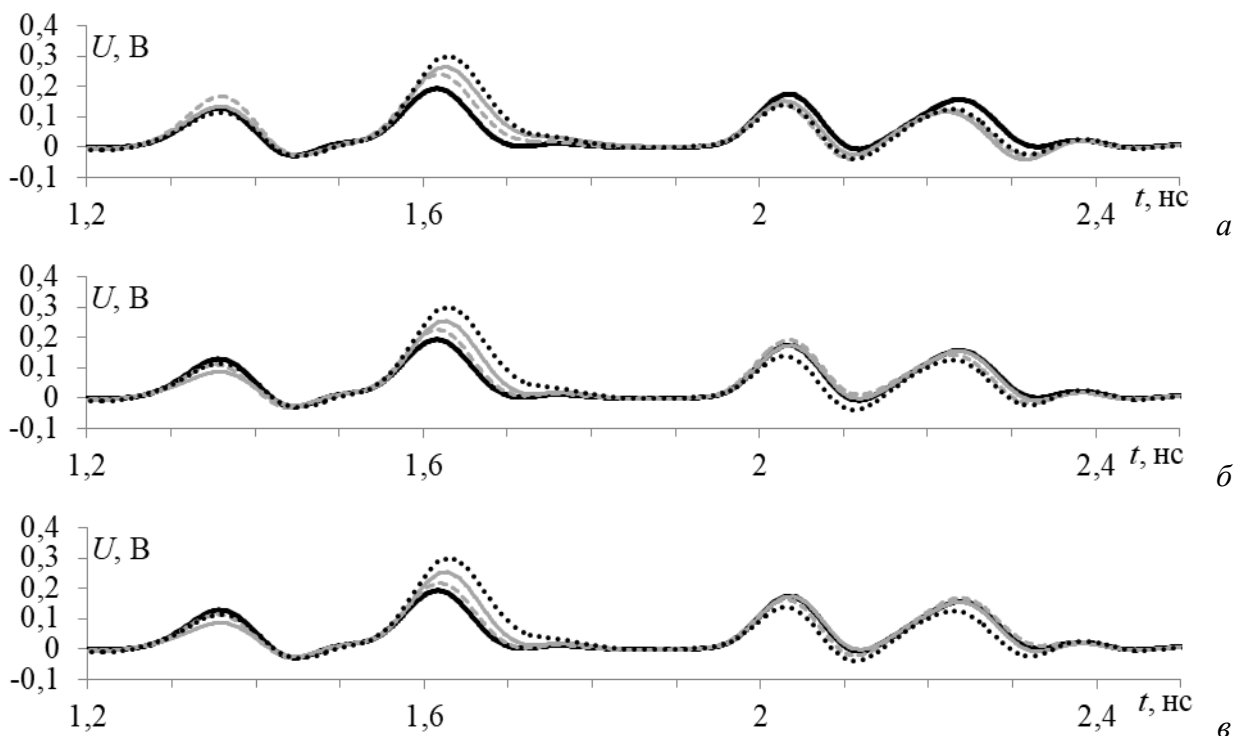


Рисунок 4.83 – Формы напряжения на выходе прототипа 1 при сигнале 120 пс для граничных условий 1 (—), 2 (---), 5 (-), 8 (...) (а); 1 (—), 3 (---), 6 (-), 8 (...) (б); 1 (—), 4 (---), 7 (-), 8 (...) (в)

Из рисунка 4.82 видно, что амплитуда напряжения на ближнем конце приблизительно равна половине амплитуды ЭДС. На дальнем конце наблюдается разложение входного импульса на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,171$ В, что меньше, чем на ближнем в 5,55 раза. Из

рисунка 4.83 видно, что формы напряжения до и после отказов различаются, до 26,8% для 50-XX, КЗ-50, 50-КЗ.

Значения $U_{\text{макс}}$ из рисунков 4.82 и 4.83, приведены в таблице 4.29. Максимальное значение наблюдается для условий 8, а минимальное – для 1 (до отказов). На рисунке 4.84 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1, 2 и 3. Видно, что если рассматривать $U_{\text{макс}}$ для случаев после отказа 1 и 2 отдельно, то после отказа 1 оптимален вариант 3, а после отказа 2 – вариант 2. Максимальная разница между минимальными и максимальными значениями $U_{\text{макс}}$ для оптимального и наихудшего вариантов после отказов 1 и 2 составляет 4 и 2,4%. Так как ни один из этих вариантов нельзя считать более предпочтительным, можно считать, что для прототипа 1 оптимальны варианты переключения 2 и 3.

Таблица 4.29 – Максимальные значения амплитуды из рисунка 4.83

Условия	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{макс}}, \text{В}$	0,195	0,242	0,227	0,219	0,266	0,255	0,265	0,302

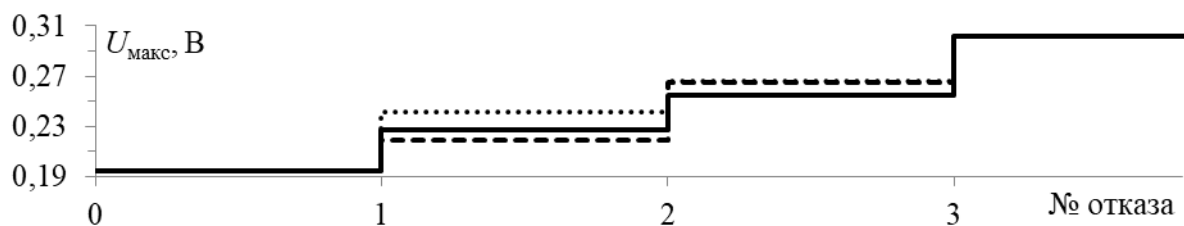


Рисунок 4.84 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1 (...), 2(—) и 3(- -)

В таблицу 4.30 сведены значения N -норм до и после отказов. Например, норма N_1 , после отказов 2 и 3 больше, чем после отказа 1. Это объясняется уникальной комбинацией импульсов, отраженных от нагрузок резервных проводников и влияющих на активный проводник. Тем же объясняются значения $U_{\text{макс}}$ для варианта 1 после отказов 1 и 2, которые больше, чем до отказов.

Таблица 4.30 – Значения N -норм для вариантов переключения 1–3 после отказов 1–3

Отказ	Вариант	Граничные условия	N_1	$N_2, 10^9$	$N_3, 10^{-12}$	$N_4, 10^{-12}$	$N_5, 10^{-6}$
До	-	50-50, 50-50, 50-50	0,195	4,038	68,22	70,9	2,754
1	1	50-XX, 50-50, 50-50	0,242	4,347	67,28	74,93	2,93
	2	50-50, 50-КЗ, 50-50	0,227	4,455	68,56	73,08	2,913
	3	50-50, 50-50, 50-КЗ	0,219	4,316	70,92	75,18	2,87
2	1	50-XX, КЗ-50, 50-50	0,266	4,643	67,4	75,72	3,031
	2	50-50, 50-КЗ, КЗ-50	0,255	4,81	71,31	75,07	3,007
	3	50-КЗ, 50-50, 50-КЗ	0,265	4,733	66,72	75,09	3,039
3	-	50-XX, КЗ-50, 50-КЗ	0,302	5,286	69,1	77,47	3,233

До отказов значение $N_1=0,195$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_1 увеличивается на 10,75 и 15,4%, для варианта 2 – на 7,5 и 7,14%, а для варианта 3 – на 5,7 и 15,2%, соответственно. После отказа 3 N_1 больше на 21,5%, чем до отказов, и на 6,3, 8,4 и 6,5%, чем

для вариантов переключения 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность сбоя схемы, электрического пробоя или возникновения дуговых эффектов в схеме для всех вариантов после отказов незначительно увеличивается.

До отказов $N_2=4,038$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_2 увеличивается на 3,6 и 6,9%, для варианта 2 – на 4,9 и 8,7%, а для варианта 3 – на 3,3 и 7,9%. После отказа 3 N_2 больше на 13,3%, чем до отказов, и на 6,47, 4,7 и 5,5%, чем для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность искрения компонента или сбоя схемы для всех вариантов после отказов незначительно увеличивается.

До отказов $N_3=68,22$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_3 уменьшается на 0,7 и 0,6%, для варианта 2 – увеличивается на 0,24 и 2,21 %, а для варианта 3 – увеличивается на 1,94% и уменьшается на 1,11%, соответственно. После отказа 3 N_3 больше на 0,64%, чем до отказов, на 1,245 и 1,75%, чем для вариантов переключения 1, 3 и на 1,57%, чем для варианта переключения 2, соответственно. Таким образом, вероятность диэлектрического пробоя после отказов при варианте переключения 1 меньше, чем при 2 и 3.

До отказов $N_4=70,9$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_4 увеличивается на 2,76 и 3,28%, для варианта 2 – на 1,51 и 2,85%, а для варианта 3 – на 2,92 и 2,87%, соответственно. После отказа 3 N_4 больше на 4,42%, чем до отказов, и на 1,142, 1,57 и 1,56%, чем для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность повреждения оборудования после отказов увеличивается.

До отказов $N_5=2,754$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_5 увеличивается на 3,09 и 4,78%, для варианта 2 – на 2,8 и 4,39%, а для варианта 3 – на 2,06 и на 4,91%, соответственно. После отказа 3 N_5 больше на 8%, чем до отказов, и на 3,22, 3,62 и 3,09%, чем для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность выгорания компонента после отказов незначительно увеличивается.

По полученным результатам можно сделать вывод, что, в основном, значения N -норм после отказов слабо растут, что говорит о том, что вероятности повреждений, которые соответствуют этим N -нормам после отказов, незначительно увеличиваются.

На рисунке 4.85 представлены формы напряжения, когда на вход подавался трапециевидный импульс общей длительностью 240 пс с ЭДС 2 В, на ближнем и дальнем концах до отказов. В предыдущем случае, когда подавался импульс длительностью 120 пс, наблюдалось полное разложение импульса помехи. В данном случае импульсы 3 и 4 накладываются друг на друга. Цель дальнейшего исследования – анализ изменений защитных характеристик в этом случае. На рисунке 4.86 представлены формы напряжения на дальнем конце структуры после отказов для вариантов, которые соответствуют порядкам переключения 1, 2 и 3 при сигнале общей длительностью 240 пс.

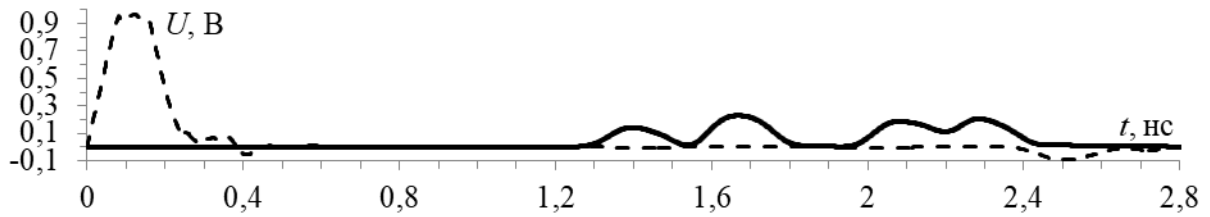


Рисунок 4.85 – Формы напряжений на ближнем (---) и дальнем (—) концах прототипа 1 до отказов при длительности воздействующего импульса 240 пс

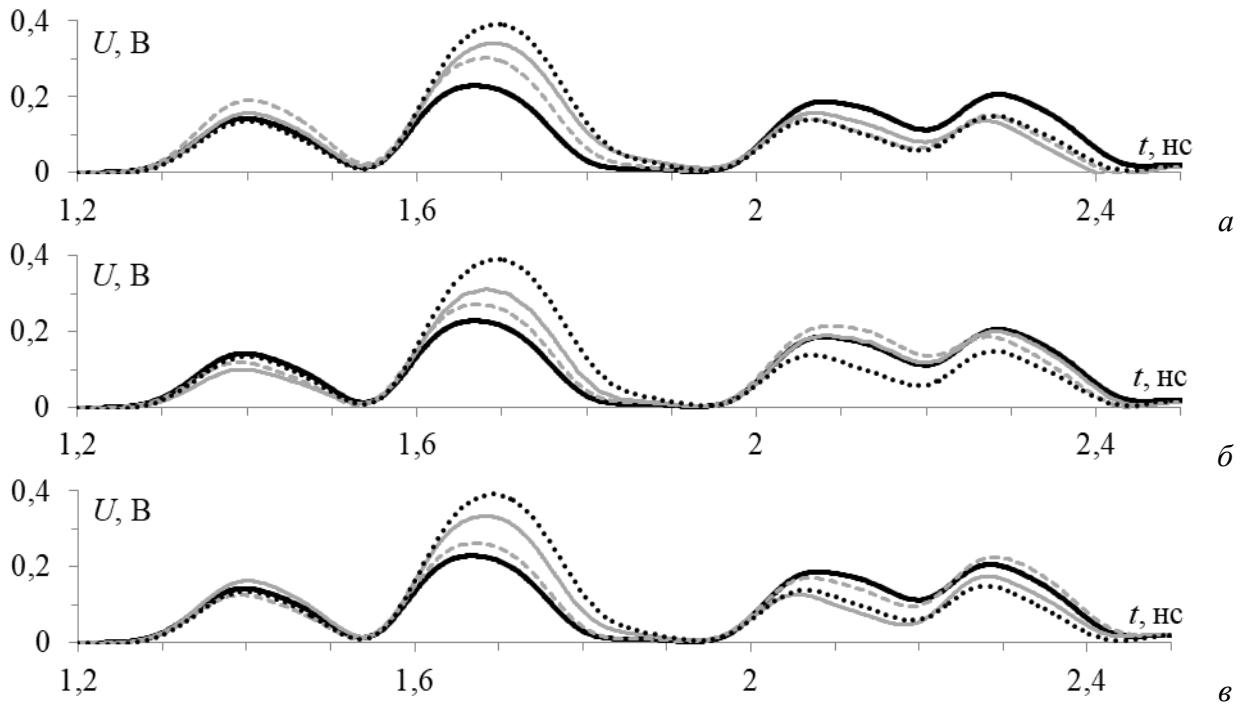


Рисунок 4.86 – Формы напряжения при длительности воздействующего импульса 240 пс для случаев 1 (—), 2 (---), 5 (-), 8 (...) (а); 1 (—), 3 (---), 6 (-), 8 (...) (б); 1 (—), 4 (---), 7 (-), 8 (...) (в)

Из рисунка 4.85 видно, что амплитуда напряжения на ближнем конце приблизительно равна половине амплитуды ЭДС. На дальнем конце наблюдается неполное разложение входного воздействия на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,218$ В, что меньше, чем на ближнем, в 4,34 раза (при длительности 120 пс нбыло ослабление 5,55 раза). Из рисунка 4.86 видно, что формы напряжения до и после отказов различаются, и для 50-XX, КЗ-50, 50-КЗ до 28%, что близко к 26,8% при длительности 120 пс.

Значения $U_{\text{макс}}$ из рисунков 4.85 и 4.86 приведены в таблице 4.31. Видно, что, если рассматривать $U_{\text{макс}}$ для случаев после отказов 1 и 2 отделен, то после отказа 1 оптимальный вариант переключения 3 а, после отказа 2 – вариант 2. Максимальные различия между оптимальными и наихудшими значениями $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 составляет 6,6 и 3%, соответственно. Так как ни один из этих вариантов нельзя считать более предпочтительным, можно считать, что для прототипа 1 оптимальны варианты переключения 2 и 3.

Максимальное значение наблюдается для граничных условий 8, а минимальное – для 1. На рисунке 4.87 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1, 2 и 3. В таблице 4.32 сведены значения N -норм до и после отказов. Далее приведен анализ N -норм для случая с длительностью импульса 120 пс.

Таблица 4.31 – Максимальные амплитуды выходного напряжения при воздействии импульса длительностью 240 пс

Условия	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{макс}}, \text{В}$	0,229	0,301	0,272	0,262	0,341	0,312	0,334	0,391

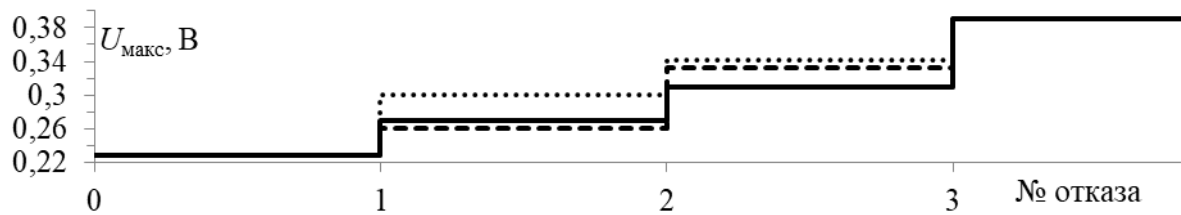


Рисунок 4.87 – $U_{\text{макс}}$ в зависимости от номера отказа, для вариантов переключения 1 (...), 2 (—), 3 (- -)

Таблица 4.32 – N -нормы для вариантов переключения 1–3 после отказов 1–3

Отказ	Вариант	Граничные условия	N_1	$N_2, 10^9$	$N_3, 10^{-12}$	$N_4, 10^{-12}$	$N_5, 10^{-6}$
До	-	50-50, 50-50, 50-50	0,229	3,019	133,8	134,1	4,351
1	1	R-XX, 50-50, 50-50	0,301	3,67	129,7	130,5	4,532
	2	50-50, 50-K3, 50-50	0,272	3,495	136,4	137,3	4,659
	3	50-50, 50-50, 50-K3	0,262	3,34	139,5	139,9	4,545
2	1	50-XX, K3-50, 50-50	0,341	3,966	134,2	136,2	4,813
	2	50-50, 50-K3, K3-50	0,312	3,989	137,1	137,9	4,835
	3	50-K3, 50-50, 50-K3	0,334	4,052	133,7	135,1	4,748
3	-	50-XX, K3-50, 50-K3	0,391	4,47	138	139,6	5,168

До отказов $N_1=0,229$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_1 увеличивается на 13,58 и 19,64%, для варианта 2 – на 8,58 и 15,34%, а для варианта 3 – на 6,72 и 18,65% соответственно. После отказа 3 N_1 больше на 19,75%, чем до отказов, и на 6,83, 11,23 и 7,86%, чем вариантов переключения 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность сбоя схемы / электрического пробоя / дуговых эффектов схемы для всех вариантов после отказов заметно увеличивается.

До отказов $N_2=3,019$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_2 увеличивается на 9,73 и 13,55%, для варианта 2 – на 7,3 и 13,84%, а для варианта 3 – на 5,04 и 14,6%, соответственно. После отказа 3 N_2 больше на 19,37%, чем до отказов, и на 5,97, 5,68 и 4,9%, что для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность искрения компонента / сбоя схемы для всех вариантов после отказов увеличивается.

До отказов $N_3=133,8$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_3 уменьшается на 1,55% и увеличивается на 0,14%, для варианта 2 увеличивается на 0,96 и 1,21%, а для варианта 3 увеличивается на 2,08% и уменьшается на 0,037%, соответственно. После отказа 3 N_3

увеличивается на 1,54% по сравнению с состоянием до отказов, а по сравнению с вариантами переключения 1–3 увеличивается на 1,39, 0,372 и 1,58%, соответственно. Таким образом, вероятность диэлектрического пробоя для всех вариантов после отказов незначительно увеличивается.

До отказов $N_4=134,1$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_4 уменьшается на 1,36% и увеличивается на 0,77%, для варианта 2 увеличивается на 1,17 и 1,39%, а для варианта 3 увеличивается на 2,11 и 0,37%, соответственно. После отказа 3 N_4 больше на 2%, чем до отказов, и на 1,23, 0,61 и 1,63%, чем для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность повреждения оборудования после отказов незначительно увеличивается.

До отказов $N_5=4,351$. После отказов 1 и 2 N_5 для варианта 1 увеличивается на 2,0376 и 5,04%, для варианта 2 – на 3,41 и 5,26%, а для варианта 3 – на 2,18 и на 4,36%, соответственно. После отказа 3 N_5 больше на 8,58%, чем до отказов, и на 3,556, 3,32 и 4,23% , чем для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность выгорания компонента после отказов незначительно увеличивается.

Также, как и для случая, когда подавался импульс длительностью 120 пс, при подаче импульса длительностью 240 пс, N -нормы после отказов растут, показывая рост вероятности повреждений, которым соответствуют эти N -нормы после отказов. Однако наблюдается рост значений всех N -норм лишь на 1–4%. Таким образом, в дальнейшем все прототипы рассматриваются при воздействии на вход импульсной помехи общей длительностью 240 пс.

На рисунке 4.88 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 2 ГГц для прототипа 1 до и после отказов (для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX) при эксперименте и электродинамическом моделировании. Отличия f_0 между моделированием и экспериментом для этих случаев составили 8,52 и 1,14%, соответственно.

На рисунке 4.89 представлены формы напряжения на дальнем конце этой структуры для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. Видны, 4 импульса разложения, для рисунка 4.89а U_{\max} равны 229 и 234 мВ, а для рисунка 4.89б – 391 и 406 мВ, соответственно. Таким образом, различия U_{\max} для эксперимента и электродинамического моделирования составили 2,13 и 3,69%, соответственно. Задержки импульса 1 для рисунков 4.89а и б при эксперименте и электродинамике отличаются и равны 1,25 и 1,18 нс (отличие между ними 5,6%), соответственно. Задержки импульса 3 для эксперимента и моделирования равны по 1,9 нс.

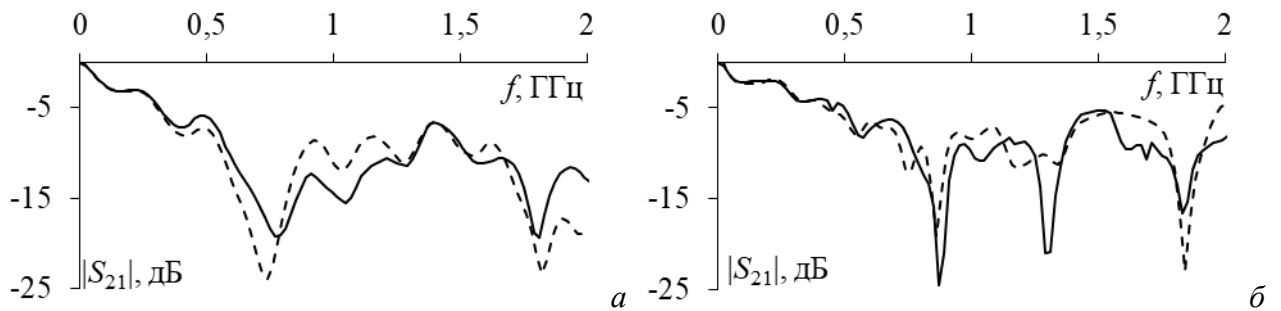


Рисунок 4.88 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 2 ГГц для прототипа 1 до (а) и после отказов для 50-XX, К3-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (---)

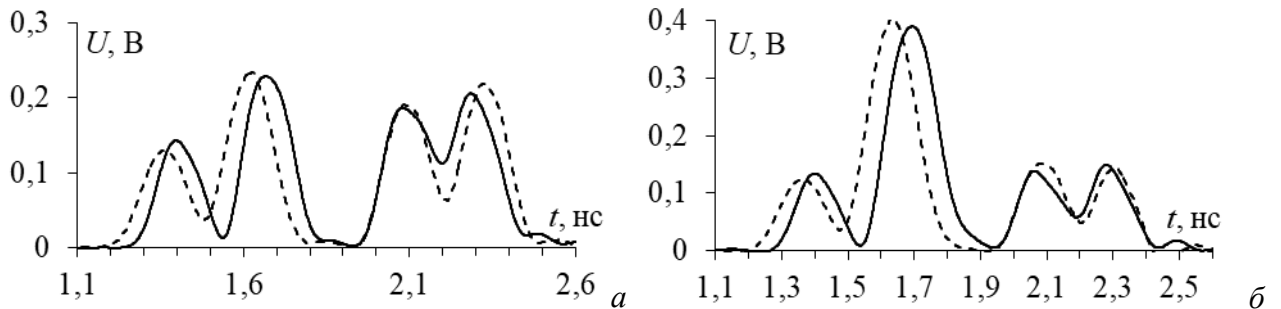


Рисунок 4.89 – Формы напряжения на дальнем конце прототипа 1 до (а) и после отказов для 50-XX, К3-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом (---) моделировании

Таким образом, максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ на дальнем конце резервируемого проводника двусторонней ПП с трехкратным МР до и после отказов при длительностях входных сигналов 120 и 240 пс составляет 26,8% и 28%, соответственно. В обоих случаях, оптимальны варианты порядка переключения 2 и 3.

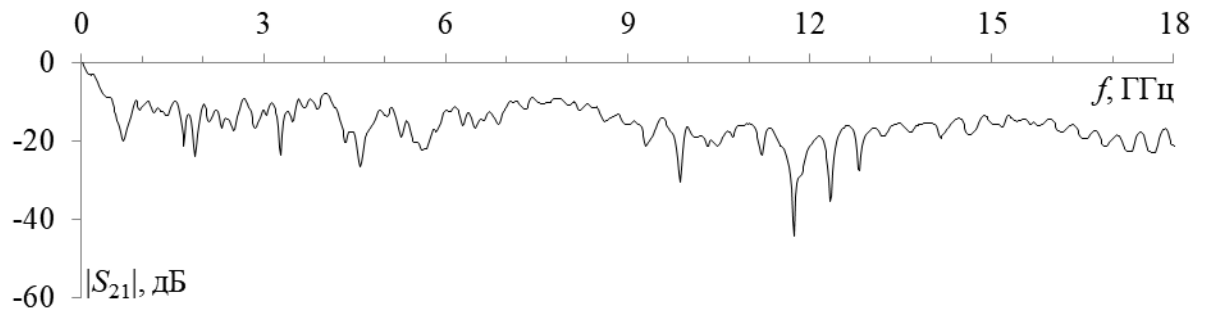
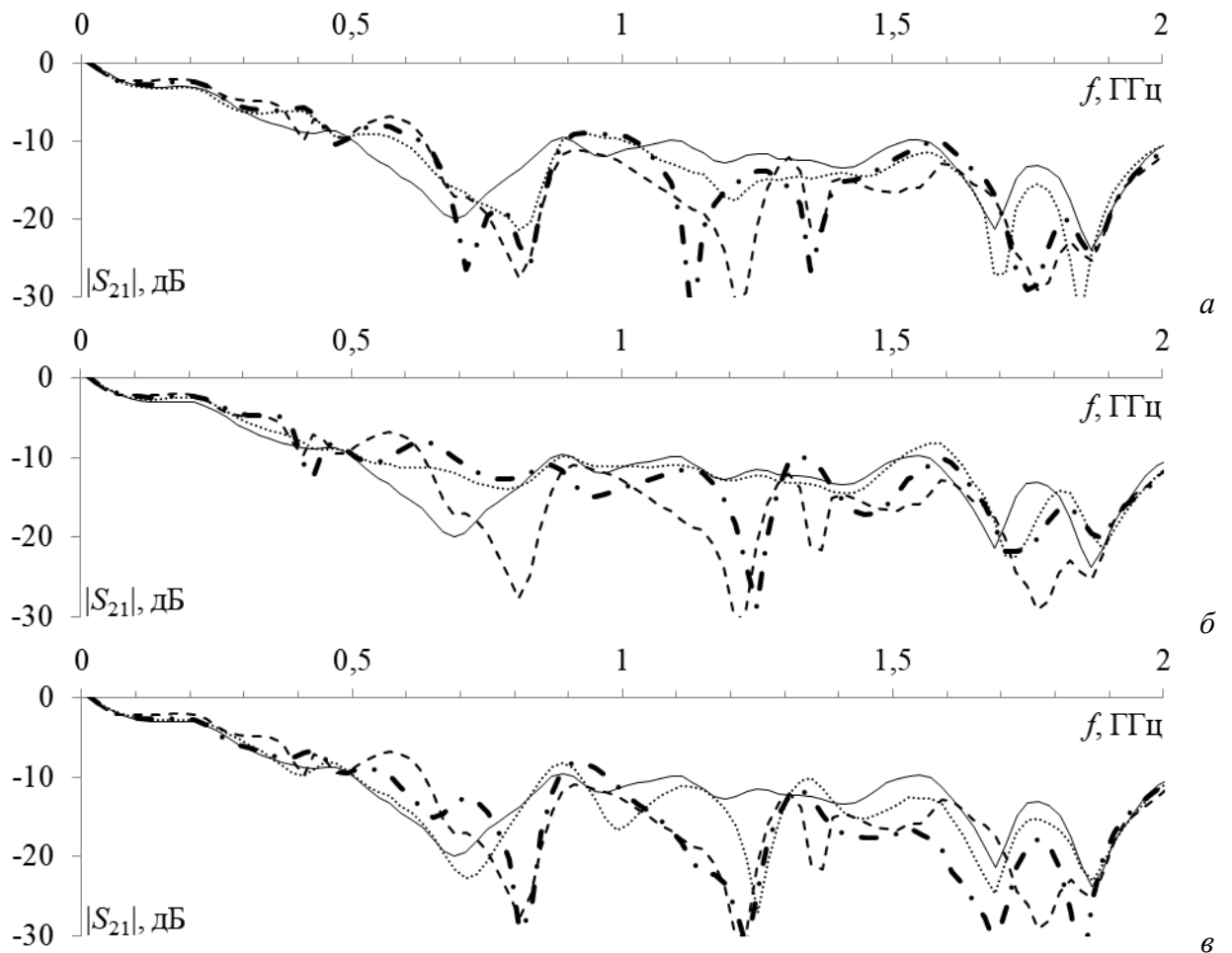
Приведенное сравнение результатов эксперимента и электродинамического моделирования во временной и частотной областях показало хорошую согласованность результатов. Максимальные отличия $U_{\text{макс}}$ и задержек равные 3,69 и 5,6%, соответственно, показали достоверность результатов.

4.3.3.4 Результаты экспериментальных исследований прототипа 2

В таблице 4.33 представлены граничные условия до и после отказов, такие же, как для предыдущего прототипа. На рисунках 4.90 и 4.91 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для вариантов до и после отказов. В таблицу 4.33 сведены характеристики в частотной области.

Таблица 4.33 – Варианты граничных условий до и после отказов и значения параметров

№ варианта	Граничные условия	f_0 , ГГц	$ S_{21} $, дБ
1	50-50, 50-50, 50-50	0,689	-20,03
2	R-XX, 50-50, 50-50	0,809	-21,33
3	50-50, 50-K3, 50-50	1,72	-22,49
4	50-50, 50-50, 50-K3	0,709	-22,72
5	50-XX, K3-50, 50-50	0,709	-26,53
6	50-50, 50-K3, K3-50	1,24	-28,827
7	50-K3, 50-50, 50-K3	0,8096	-29,34
8	50-XX, K3-50, 50-K3	0,8096	-27,64

Рисунок 4.90 – Частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц для прототипа 2 до отказовРисунок 4.91 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипа 2 с граничными условиями для вариантов:

1 (—), 2 (···), 5 (-·-), 8 (---) (а); 1 (—), 3 (···), 6 (-·-), 8 (---) (б); 1 (—), 4 (···), 7 (-·-), 8 (---) (в)

Видно, что максимальное значение f_0 наблюдается при граничных условиях 3 (таблица 4.33) и равна 1,72 ГГц, тогда как минимальное – при граничных условиях 1 и составляет 0,689 ГГц. Разница между ними составляет 42,8%. Максимальное ослабление наблюдается при условиях 7 и равно 29,34 дБ, тогда как минимальное – при условиях 1 и равно 20,03 дБ. Разница между ними составляет 9,31 дБ.

На рисунке 4.92 представлены формы напряжения (на вход подавался трапецевидный импульс общей длительностью 240 пс с амплитудой ЭДС 2 В) на ближнем и дальнем концах до отказов. На рисунке 4.93 представлены формы напряжения на дальнем конце структуры после отказов для вариантов, которые соответствуют порядкам переключения 1, 2 и 3 при сигнале общей длительностью 240 пс.

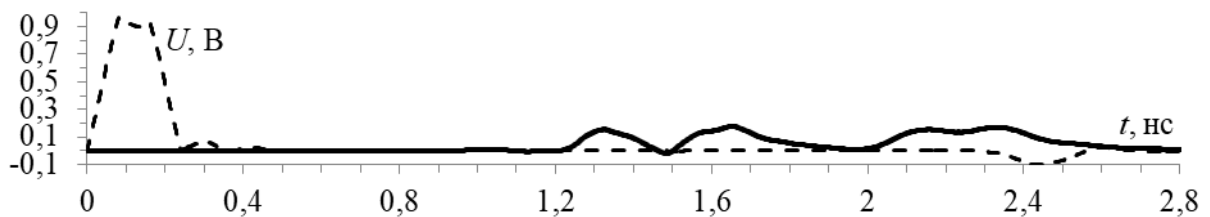


Рисунок 4.92 – Формы напряжения на ближнем (---) и дальнем (—) концах прототипа 2 до отказов

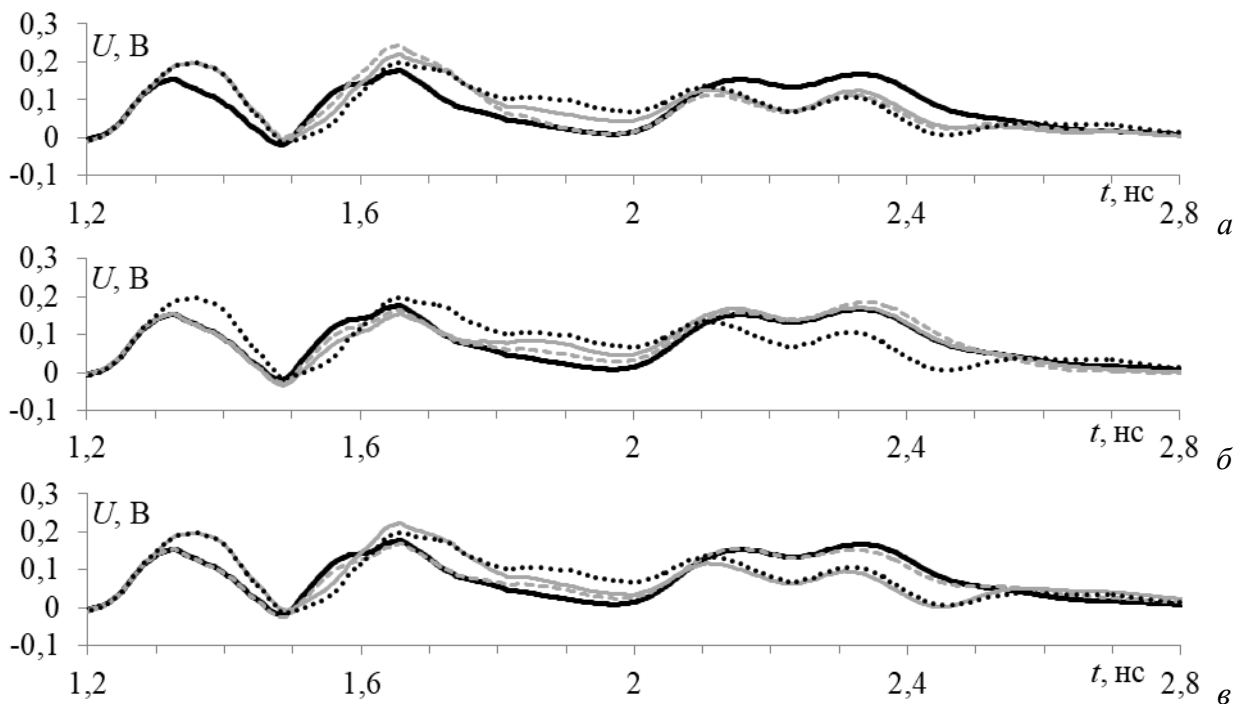


Рисунок 4.93 – Формы напряжений для граничных условий

1 (—), 2 (---), 5 (-), 8 (...) (а), 1 (—), 3 (---); 6 (-), 8 (...) (б), 1 (—), 4 (---), 7 (-), 8 (...) (в)

Из рисунка 4.92 видно, что амплитуда напряжения на ближнем конце приблизительно равна половине амплитуды ЭДС. На дальнем конце наблюдается неполное разложение входного воздействия на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,173$ В, что меньше, чем на ближнем в 5,49 раза. Из рисунка 4.93 видно, что формы напряжения до и после отказов различаются до 16,25% для

50-XX, 50-50, 50-50 (после отказа 1). Значения $U_{\text{макс}}$ из рисунков 4.92 и 4.93 сведены в таблицу 4.34. Максимальное значение наблюдается при условиях 8, тогда как минимальное – при условиях 4.

На рисунке 4.94 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1, 2 и 3. Видно, что если рассматривать $U_{\text{макс}}$ для случаев после отказа 1 и 2 отдельно, то после отказа 1 оптимален вариант 3 а, после отказа 2 – вариант 2. Максимальная разница между минимальными и максимальными значениями $U_{\text{макс}}$ для оптимального и наихудшего вариантов после отказов 1 и 2 составляет 21 и 13%. Однако, для варианта 2 отличие $U_{\text{макс}}$ от варианта 3 после отказа 1 составляет всего 3%. Поэтому можно считать, что для прототипа 2 оптимальный вариант переключения 2.

В таблицу 4.35 сведены значения N -норм до и после отказов.

Таблица 4.34 – Значения максимальных амплитуд из рисунков 4.93

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{макс}}$	0,177	0,243	0,186	0,167	0,219	0,172	0,223	0,199

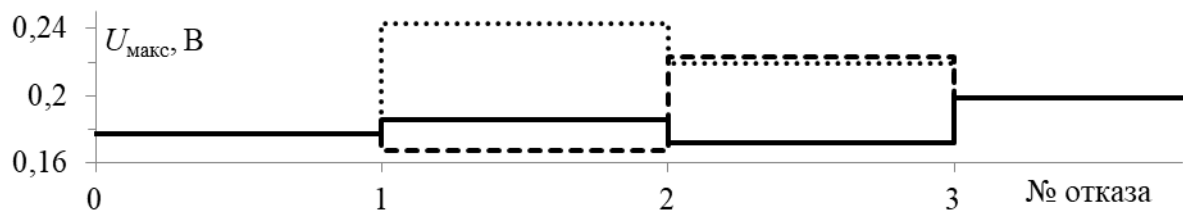


Рисунок 4.94 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1 (...), 2(—) и 3(---)

Таблица 4.35 – Значения N -норм при вариантах переключения 1-3 после отказов 1-3

Отказ	Вариант	Граничные условия	N_1	$N_2, 10^9$	$N_3, 10^{-12}$	$N_4, 10^{-12}$	$N_5, 10^{-6}$
До	-	50-50, 50-50, 50-50	0,177	2,501	128,9	131	3,882
1	1	50-XX, 50-50, 50-50	0,243	3,015	123,4	128,4	4,022
	2	50-50, 50-К3, 50-50	0,186	2,508	131	134,1	4,01
	3	50-50, 50-50, 50-К3	0,167	2,503	130,3	133	3,784
2	1	50-XX, К3-50, 50-50	0,219	2,896	127,9	133,5	4
	2	50-50, 50-К3, К3-50	0,172	2,519	131,2	139,7	3,988
	3	50-К3, 50-50, 50-К3	0,223	2,991	131,1	132,7	3,923
3	-	50-XX, К3-50, 50-К3	0,199	2,896	128,5	142,2	4,019

До отказов значение $N_1=0,177$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_1 увеличивается на 15,71 и 10,6%, для варианта 2 увеличивается на 2,47% и уменьшается на 1,43%, а для варианта 3 уменьшается на 2,9% и увеличивается на 11,5%, соответственно. После отказа 3 N_1 больше на 5,85%, чем до отказов, и меньше на 4,78, и 5,68%, чем для вариантов 1, 3, и больше на 7,27%, чем для варианта 2, соответственно. Таким образом, вероятность сбоя схемы / электрического пробоя / дуговых эффектов схемы для всех вариантов после отказов незначительно увеличивается.

До отказов $N_2=2,501$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_2 увеличивается на 9,31 и 7,31%, для варианта 2 увеличивается на 0,139 и 0,35%, а для варианта 3 увеличивается на 0,039 и 8,92%, соответственно. После отказа 3 N_2 больше на 7,31% по сравнению с состоянием до отказов, не изменяется для варианта переключения 1, и больше на 6,96%, чем для варианта 2 увеличивается, и меньше на 1,61, чем для варианта 3, соответственно. Таким образом, вероятность искрения компонента / сбоя схемы для всех вариантов после отказов увеличивается.

До отказов $N_3=128,9$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_3 уменьшается на 2,17 и 0,38%, для варианта 2 увеличивается на 0,8 и 0,884%, а для варианта 3 увеличивается на 0,54 и 0,84%, соответственно. После отказа 3 N_3 меньше на 0,156%, чем до отказов, и меньше на 1,03 и 1,001%, чем для вариантов переключения 2, 3, и больше на 0,23%, чем для варианта переключения 1, соответственно. Таким образом, вероятность диэлектрического пробоя после отказов при варианте переключения 1 меньше, чем при 2 и 3.

До отказов $N_4=131$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_4 уменьшается на 2,76% и увеличивается на 1,0023%, для варианта 2 увеличивается на 1,16 и 3,21 %, а для варианта 3 увеличивается на 0,75 и 0,644%, соответственно. После отказа 3 N_4 больше на 4,09%, чем до отказов, и на 3,15, 0,886 и 3,45%, чем для вариантов переключения 1,2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность повреждения оборудования после отказов увеличивается.

До отказов $N_5=3,882$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_5 увеличивается на 4,022 и 4%, для варианта 2 увеличивается на 1,62 и 1,34%, а для варианта 3 уменьшается на 1,27 и на 1,8%, соответственно. После отказа 3 N_5 больше на 1,73%, чем до отказов, и на 0,23, 0,38 и 1,208%, чем для вариантов переключения 1–3, соответственно. Таким образом, вероятность выгорания компонента после отказов увеличивается.

Таким образом, для прототипов 1 и 2 максимальные увеличения N_1 после отказов для всех вариантов переключения составляют 19,75 и 15,71%, N_2 – 14,6 и 9,3%, N_3 – 2,17 и 2,08%, N_4 – 2,76 и 1,63, N_5 – 5,26 и 4,022%, соответственно. Наблюдается небольшое увеличение отказоустойчивости для прототипа 2 относительно прототипа 1.

На рисунке 4.95 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 20 ГГц для прототипа 2 до и после отказов (для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX) при эксперименте и электродинамическом моделировании. Отличия f_0 между моделированием и экспериментом для этих случаев составили 0,01 и 15,95%, соответственно.

На рисунке 4.96 представлены формы напряжения на дальнем конце этой структуры для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. Видны 4 импульса разложения, для рисунка 4.96 а U_{\max} равны 180 и 170 мВ, а для рисунка 4.96 б – 200 и 210 мВ, соответственно. Таким образом, различия U_{\max} для эксперимента и

электродинамического моделирования составило 5,07 и 6,8%, соответственно. Задержки импульса 1 для рисунка 4.96а и б при эксперименте и электродинамике отличаются и равны по 1,2 и 1,21 нс (разница между ними 0,82%), соответственно. Задержки импульса 3 для эксперимента и моделирования равны по 1,99 и 2,01 нс (разница между ними 0,99%), соответственно.

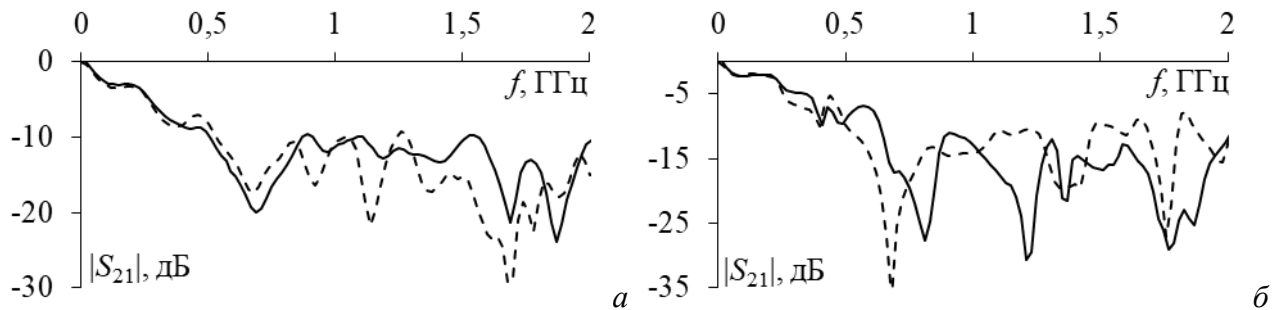


Рисунок 4.95 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 20 ГГц для прототипа 2 до (а) и после отказов для 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (---)

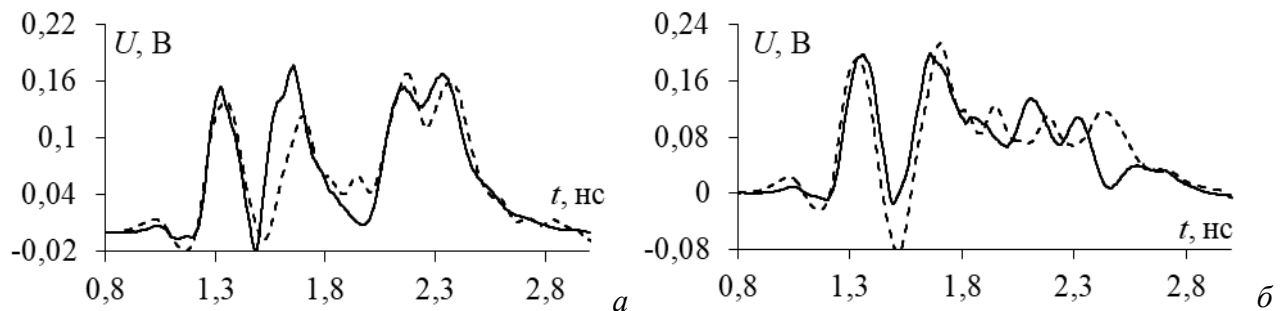


Рисунок 4.96 – Формы напряжений на дальнем конце прототипа 2 до (а) и после отказов для 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом (---) анализе

Таким образом, максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ на дальнем конце резервируемого проводника двусторонней ПП с трехкратным МР до и после отказов составляет 16,25%, соответственно. Оптимальный вариант порядка переключения 2.

Приведенное сравнение результатов эксперимента и электродинамического моделирования во временной и частотной областях показало хорошую согласованность результатов. Максимальные отличия $U_{\text{макс}}$ и задержек на 6,8 и 1,32%, соответственно, показали достоверность результатов.

4.3.3.5 Результаты экспериментальных исследований прототипа 3

В таблице 4.36 представлены граничные условия до и после отказов, такие же как для прототипов 1 и 2. На рисунках 4.97 и 4.98 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для случаев до и после отказов. В таблицу 4.36 сведены характеристики в частотной области.

Таблица 4.36 – Случаи граничных условий до и после отказов и характеристики в частотной области

№ варианта	Граничные условия	f_0 , ГГц	$ S_{21} $, дБ
1	50-50, 50-50, 50-50	0,8096	-16,45
2	R-XX, 50-50, 50-50	1,109	-12,62
3	50-50, 50-K3, 50-50	0,8096	-26,101
4	50-50, 50-50, 50-K3	0,7896	-15,29
5	50-XX, K3-50, 50-50	0,8096	-14,94
6	50-50, 50-K3, K3-50	0,769	-35,42
7	50-K3, 50-50, 50-K3	1,8091	-23,53
8	50-XX, K3-50, 50-K3	0,769	-13,803

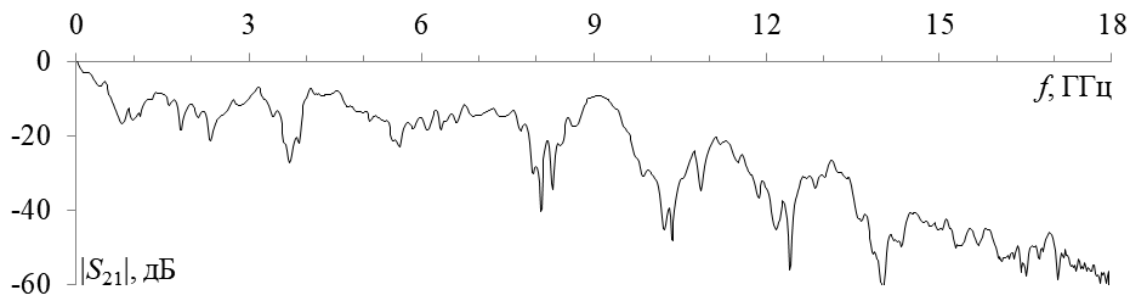


Рисунок 4.97 – Частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц для прототипа 3 до отказов

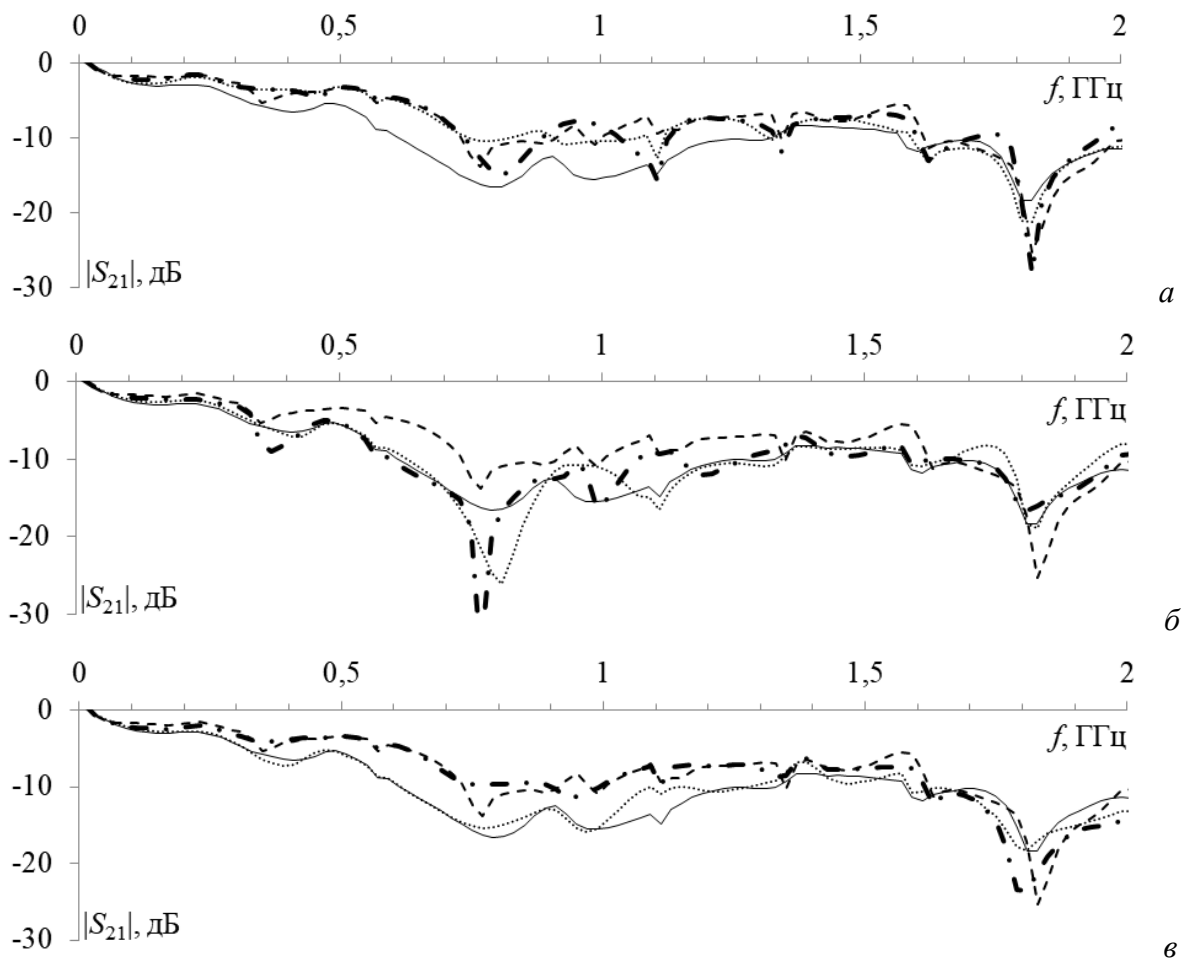


Рисунок 4.98 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ прототипа с граничными условиями 1 (—), 2 (...), 5 (-•-), 8 (---) (а); 1 (—), 3 (...), 6 (-•-), 8 (---) (б); 1 (—), 4 (...), 7 (-•-), 8 (---) (в)

Видно, что наибольшее значение f_0 наблюдается при граничных условиях 7 (таблица 4.36) и равно 1,809 ГГц, тогда как минимальное – при 6 и 8, которые равны 0,769 ГГц. Разница между ними составляет 40,34%. Максимальное ослабление наблюдается при условиях 6 и равно 35,42 дБ, тогда как минимальное – при условиях 2 и равно 12,62 дБ. Разница между ними составляет 22,8 дБ. На рисунке 4.99 представлены формы напряжения (на вход подавался трапецевидный импульс общей длительностью 240 пс с амплитудой ЭДС 2 В) на ближнем и дальнем концах до отказов. На рисунке 4.100 представлены формы напряжений на дальнем конце структуры после отказов для вариантов, которые соответствуют порядкам переключения 1, 2 и 3 при сигнале, общей длительностью 240 пс.

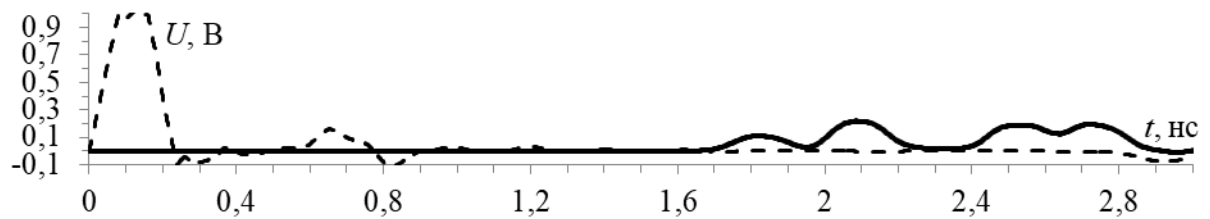


Рисунок 4.99 – Формы напряжения на ближнем (---) и дальнем (—) концах прототипа 3 до отказов

Из рисунка 4.99 видно, что амплитуда напряжения на ближнем конце равна половине амплитуды ЭДС. На дальнем конце наблюдается разложение на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,2134$ В, что меньше, чем на ближнем в 4,45 раза. Из рисунка 4.100 видно, что формы напряжения до и после отказов различаются до 15,88% для 50-XX, КЗ-50, 50-КЗ.

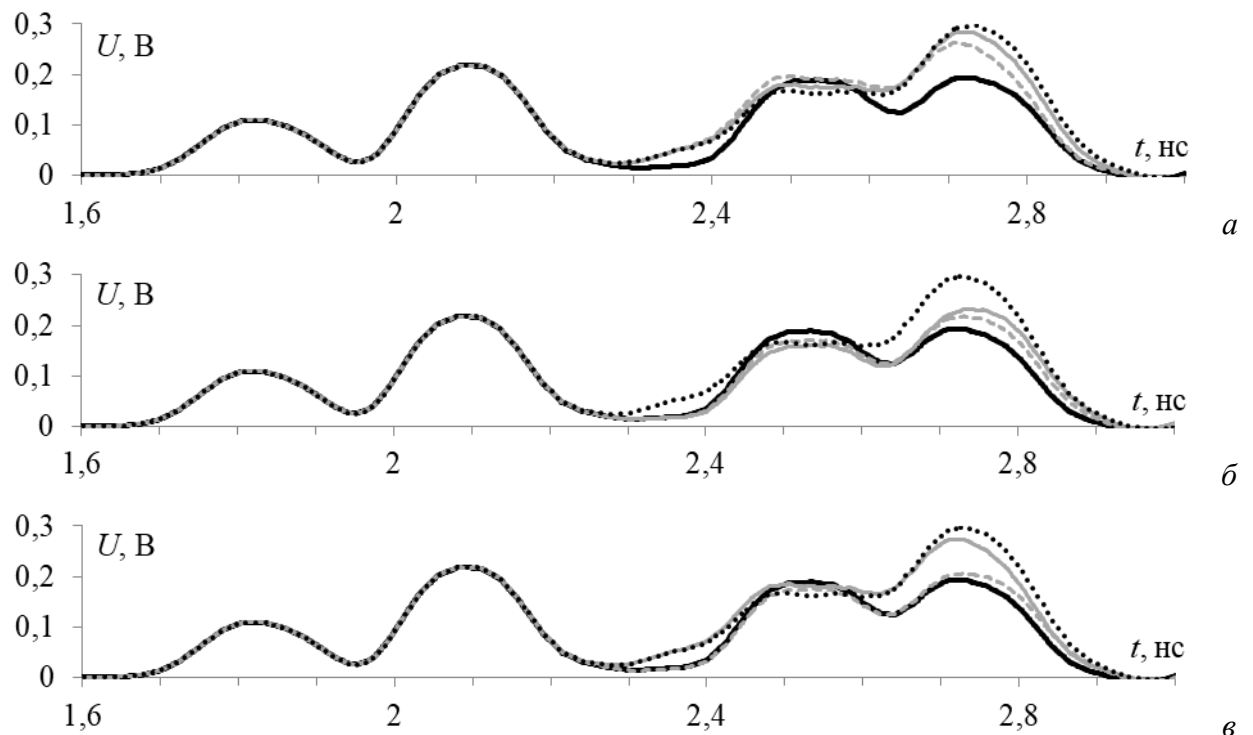


Рисунок 4.100 – Фомы напряжения на выходе прототипа 3

1 (—), 2 (---), 5 (-), 8 (...) (а); 1 (—), 3 (---), 6 (-), 8 (...) (б); 1 (—), 4 (---); 7 (-); 8 (...) (в)

Значения $U_{\text{макс}}$ из рисунков 4.99 и 4.100, приведены в таблице 4.37. Максимальное значение наблюдается для условий 8, а минимальное – для 1.

На рисунке 4.101 представлены зависимости значений $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1, 2 и 3. Видно, что оптimalен вариант 2. Максимальная разница между минимальными и максимальными значениями $U_{\text{макс}}$ для оптимального и наихудшего из вариантов после отказов 1 и 2 составляет 8,6 и 7,6%.

Таблица 4.37 – Значения максимальных амплитуд из рисунков 4.99 и 4.100

Условие	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{макс}}$	0,218	0,263	0,219	0,218	0,283	0,232	0,272	0,298

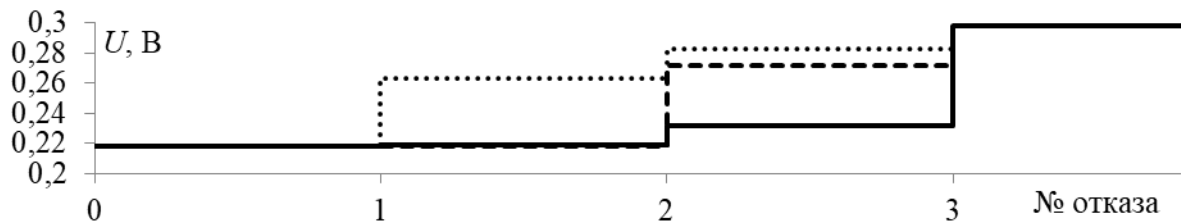


Рисунок 4.101 – Зависимости $U_{\text{макс}}$ от № отказа для вариантов переключения 1 (...), 2(—) и 3(- -)

В таблицу 4.38 сведены значения N -норм до и после отказов.

Таблица 4.38 – N -нормы при вариантах переключения 1–3 после отказов 1–3

Отказ	Вариант	Граничные условия	N_1	$N_2, 10^9$	$N_3, 10^{-12}$	$N_4, 10^{-12}$	$N_5, 10^{-6}$
До	-	50-50, 50-50, 50-50	0,218	2,64	182,1	185,2	4,613
1	1	50-XX, 50-50, 50-50	0,263	2,638	185,8	228	5,333
	2	50-50, 50-К3, 50-50	0,219	2,636	190	201,4	4,778
	3	50-50, 50-50, 50-К3	0,218	2,645	185,8	192,4	4,667
2	1	50-XX, К3-50, 50-50	0,283	2,799	203,2	244,7	5,598
	2	50-50, 50-К3, К3-50	0,232	2,644	190	194,8	4,761
	3	50-К3, 50-50, 50-К3	0,272	2,745	195	239,2	5,479
3	-	50-XX, К3-50, 50-К3	0,298	2,928	211,5	250,4	5,708

До отказов $N_1=0,218$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_1 увеличивается на 9,35 и 12,97%, для варианта 2 – на 0,22 и 3,11%, а для варианта 3 не изменяется и увеличивается на 11,02%, соответственно. После отказа 3 N_1 больше на 15,5%, чем до отказов, и на 2,58, 12,45 и 4,56%, чем для вариантов переключения 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность сбоя схемы / электрического пробоя / дуговых эффектов схемы для всех вариантов после отказов увеличивается.

До отказов $N_2=2,64$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_2 уменьшается на 0,03% и увеличивается на 2,92%, для варианта 2 уменьшается на 0,07% и увеличивается на 0,07%, а для варианта 3 увеличивается на 0,09 и 1,94%, соответственно. После отказа 3 N_2 больше на 5,17%, чем до отказов, и на 2,25, 5,09 и 3,22%, чем для вариантов переключения 1, 2 и 3,

соответственно. Таким образом, вероятность искрения компонента / сбоя схемы для всех вариантов после отказов незначительно увеличивается.

До отказов $N_3=182,1$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_3 увеличивается на 1 и 5,47%, для варианта 2 увеличивается на 2,12 и 2,12%, а для варианта 3 увеличивается на 1 и 3,42% соответственно. После отказа 3 N_3 больше на 7,46%, чем до отказов, и на 2, 5,35 и 4,05%, чем для вариантов переключения 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность диэлектрического пробоя после отказов при варианте переключения 1 меньше, чем при 2 и 3.

До отказов $N_4=185,2$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_4 увеличивается на 10,35 и 13,84%, для варианта 2 – на 4,19 и 2,52%, а для варианта 3 – на 1,906 и 12,72%, соответственно. После отказа 3 N_4 больше на 14,96%, чем до отказов, и на 1,15, 12,48 и 2,28%, чем для вариантов переключения 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность повреждения оборудования после отказов увеличивается.

До отказов $N_5=4,613$. После отказов 1 и 2 для варианта 1 N_5 увеличивается на 7,23 и 9,64%, для варианта 2 – на 1,75 и 1,57%, а для варианта 3 – на 0,58 и на 8,58%, соответственно. После отказа 3 N_5 больше на 10,6%, чем до отказов, и на 0,972, 9,04 и 2,04%, чем для вариантов переключения 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, вероятность выгорания компонента после отказов увеличивается.

На рисунке 4.102 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 20 ГГц для прототипа 3 до и после отказов (для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX) при эксперименте и электродинамическом моделировании. Отличия f_0 между моделированием и экспериментом для этих случаев составили 5,85 и 5%, соответственно.

На рисунке 4.103 представлены формы напряжения на дальнем конце структуры для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и электродинамическом моделировании. Видны 4 импульса разложения, для рисунка 4.103а U_{\max} равны 220 и 330 мВ, а для рисунка 4.103б – 300 и 380 мВ, соответственно. Таким образом, различия U_{\max} для эксперимента и электродинамического моделирования составило 28,443 и 22,01%, соответственно. Задержки импульса 1 для рисунков 4.103а и б при эксперименте и электродинамике отличаются и равны по 1,64 и 1,62 (отличие между ними 1,21%), соответственно. Задержки третьего импульса для эксперимента и моделирования равны по 2,31 и 2,35 нс (отличие между ними 1,7%), соответственно.

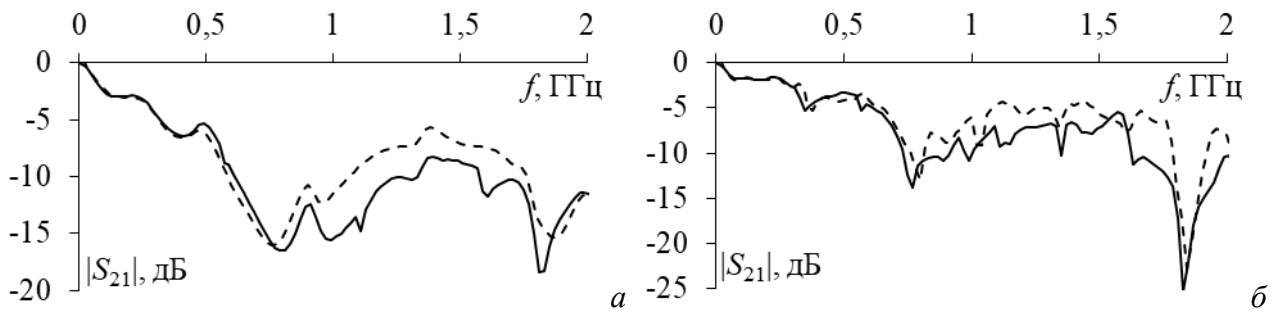


Рисунок 4.102 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 20 ГГц прототипа 3 до (а) и после отказов для варианта 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом анализе (---)

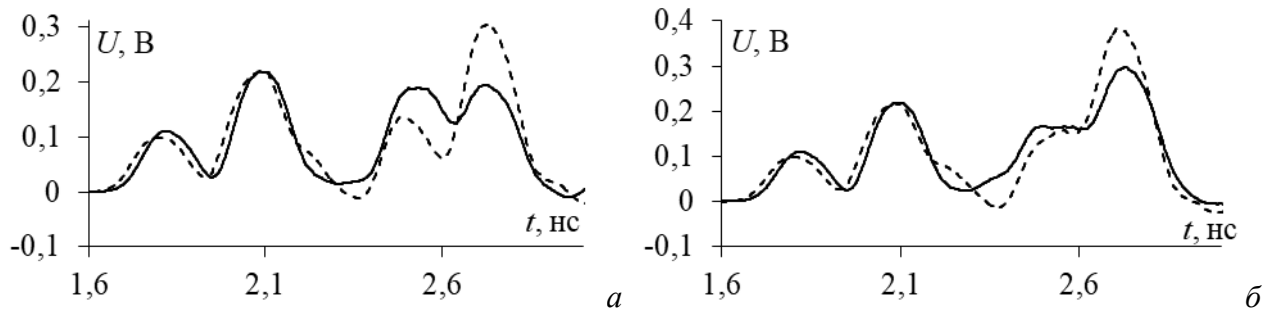


Рисунок 4.103 – Формы напряжений на дальнем конце структуры до (а) и после отказов для 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом анализе (---)

Таким образом, максимальное изменение U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника двусторонней ПП с трехкратным МР до и после отказов составляет 15,88%, соответственно. Оптимальный вариант порядка переключения 2. Приведенное исследование показало хорошую сходимость результатов моделирования и эксперимента во временной и частотной областях. Максимальные отличия U_{\max} и задержек на 28,443 и 3,81%, соответственно, показали достоверность результатов.

4.3.3.6 Основные результаты пункта

Таким образом, получено, что, в основном, значения N -норм после отказов растут для всех прототипов, что говорит о том, что вероятности повреждений, которым соответствуют эти N -нормы увеличиваются. Для прототипа 3 наблюдается такое же плавное изменение характеристик, как и прототипа 1. Это объясняется тем, что в резервируемой цепи наведенные импульсы, которые отразились от нагрузок накладываются на соседние импульсы, приходя то с отрицательной, то с положительной полярностью, как для прототипа 2. В большинстве случаев отказов N -нормы меньше для варианта 3, чем для других, поэтому он оптимален для всех трех прототипов. Так, для прототипа 1, N_1 и N_2 после отказов 1 и 2 меньше для вариантов 3 и 2, чем другие, соответственно, а N_3 , N_4 и N_5 меньше для вариантов 1 и 3, чем другие, соответственно. Для прототипа 2, N_1 и N_2 после отказов 1 и 2 меньше для вариантов 3 и 2, чем других, соответственно, а N_3 и N_4 меньше для вариантов 1 и 3, чем других, соответственно. N_5 после отказов 1 и 2 меньше для варианта 3, чем других. Для прототипа 3, N_1 , N_3 , N_4 и N_5 после

отказов 1 и 2 меньше для вариантов 3 и 2, чем других, соответственно. Норма N_2 после отказов 1 и 2 меньше для варианта 2, чем для других.

Выполнена экспериментальная оценка изменения $U_{\text{макс}}$ импульсов разложения в двусторонней ПП с трехкратным МР после отказов. Изготовлены три прототипа с оптимальными параметрами. На дальнем конце резервируемого проводника наблюдается разложение на 4 импульса при различных длительностях входного импульса. Для прототипа 1 максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов при длительностях 120 и 240 пс составляет 26,8% и 28%, соответственно. В обоих случаях, оптимальны варианты переключения 2 и 3. Для прототипа 2 максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 16,25%, соответственно. Оптимален вариант переключения 2. Для прототипа 3 максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 15,88%. Оптимален вариант переключения 2.

4.3.4 Основные результаты подраздела

Выполнены экспериментальные исследования прототипов ПП с исполнением опорных проводников сверху и снизу, а также в центре. Так, для проводника в центре, $U_{\text{макс}}$ изменяется всего на 2,76% для случаев до и после отказов (рассматривался худший случай). При этом были большие потери в диэлектрике, так как использовался FR-4 с $\text{tg}\delta=0,01$ при длине ЛП 1 м. На прототипе ПП с исполнением опорного проводника сверху и снизу выявлено, что на выходные характеристики сильно влияют отводы от регулярной части до SMA соединителей. С учетом этих экспериментальных исследований впервые разработан прототип ПП с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов. Он изготовлен в трех реализациях, которые отличаются отводами до SMA соединителей. Для экспериментальной оценки изменения $U_{\text{макс}}$ после отказов. Кроме того, экспериментально определен оптимальный порядок переключения для трех прототипов ПП с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов. Для прототипа 1 показано, что максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов при длительностях входных сигналов 120 и 240 пс составляет 26,8% и 28%, соответственно. В обоих случаях оптимальны варианты переключения 2 и 3. Для прототипа 2 показано, что максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 16,25%, и оптимален вариант переключения 2. Для прототипа 3 показано, что максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 15,88%, и оптимален вариант переключения 2. Также рассчитаны N -нормы для всех прототипов. Показано, что они растут для всех прототипов, что говорит о росте вероятности повреждений, соответствующих этим N -нормам после отказов. В большинстве случаев отказов N -нормы меньше для варианта 3, чем для других вариантов, поэтому он оптимален для всех трех прототипов.

4.4 Основные результаты раздела

1. Проведен многовариантный анализ структуры с МР с исполнением опорных проводников сверху и снизу, показавший, что при изменении геометрических параметров значение $U_{\text{макс}}$ остается практически неизменным и равно 0,25 В. Однако после отказов согласование нарушается, и значение $U_{\text{макс}}$ зависит от геометрических параметров поперечного сечения. Наименьшее ослабление в результате перебора всех вариантов отказов (63 варианта, в т.ч. до отказа) обеспечивается после отказа 3. Оценено влияние параметров поперечного сечения структуры на $U_{\text{макс}}$ до и после отказов. Получено, что при изменении w и t значение $U_{\text{макс}}$ после отказа 3 неизменно во всем диапазоне. С ростом s , $U_{\text{макс}}$ после отказа 3 уменьшается от 0,38 до 0,32 В (на 8,6%). С ростом h_1 , $U_{\text{макс}}$ после отказа 3 уменьшается от 0,38 до 0,33 В (на 7%). С ростом h_2 , $U_{\text{макс}}$ после отказа 3 увеличивается от 0,29 до 0,40 В (на 16%).

2. Детально исследован оптимальный порядок переключения после отказов на концах и вдоль проводников структур с МР с исполнением опорного проводника в центре, в виде боковых полигонов и сверху и снизу, с исходным и оптимальным наборами параметров. В результате разработан алгоритм анализа после отказов. Так, для структуры с исполнением опорного проводника в центре с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 на 13% и 69% меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника вокруг с оптимизированным набором параметров оптимален вариант 1, поскольку $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 на 5% и 38% меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу с оптимальным набором параметров оптимален вариант 3, поскольку $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 на 8% и 54% меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов с оптимизированным набором параметров оптимален вариант 3, поскольку $U_{\text{макс}}$ после отказов 1 и 2 на 19% и 72% меньше, чем для наихудшего варианта. Таким образом, выбор оптимального варианта переключения после отказов 1 и 2 для рассмотренных структур позволяет уменьшить $U_{\text{макс}}$ на 5–72%.

3. Выполнено экспериментальное исследование прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников сверху и снизу. До отказов наблюдается ослабление импульса помехи в 6,3 раза. После отказов, на активный проводник влияют отражения от нагрузок на пассивных проводниках, за счет чего значение $U_{\text{макс}}$ меняется. Максимальное увеличение $U_{\text{макс}}$ после отказов (всего для одного варианта К3-50, 50-50, 50-К3) достигает 8% от случая до отказов. В основном, изменения остаются на уровне 1,2% от случая до отказов. Это

объясняется наличием отводов до SMA соединителей, в которых отраженные импульсы приходят с задержкой и, таким образом, практически не накладываются на основные импульсы. Исходя из анализа N -норм можно заключить, что, в целом, оптимален вариант порядка переключения 2. Для него вероятность отказов компонента меньше, чем у других. Так, норма N_1 для варианта 1 после отказов 1 и 2 меньше, чем для вариантов 2 и 3. Норма N_2 для всех вариантов практически не отличается (максимальное отличие 0,39%). Однако нормы N_3 , N_4 и N_5 для варианта 2 после отказов 1 и 2, меньше, чем для вариантов 1 и 3.

4. Выполнено экспериментальное исследование прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников в центре. Результаты эксперимента показали, что формы импульсов разложения в данном случае для вариантов до и после отказов практически не отличаются. Это отчасти объясняется большой длиной структуры и потерями в ЛП. Все отклики для случаев до и после отказов сглаживаются. Так, для случая до отказов на дальнем конце наблюдается разложение на 4 импульса с $U_{\text{макс}}=0,0877$ В. $U_{\text{макс}}$ до отказов меньше, чем напряжение на ближнем конце в 11,36 раза. При этом максимальная разница между $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 2,76%. Наибольшее $U_{\text{макс}}=0,0932$ В наблюдается для случая 50-50, 50-К3, К3-50 на концах пассивных проводников.

5. Разработаны три прототипа ПП с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов. Прототипы отличаются различными реализациями отводов от регулярной части до SMA соединителей. Сначала выполнена оптимизация структуры эвристическим поиском, которая проводилась по двум критериям: диапазонно-временной и согласование с трактом. Цель разработки прототипов – это оценить максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов, и экспериментально определить оптимальный порядок переключения.

6. Прототип 1 отличается тем, что на концах пассивных проводников установлены SMD-резисторы и минимизированы отводы на пассивных проводниках. Показано, что максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов при длительностях входных сигналов 120 и 240 пс составляет 26,8% и 28%, соответственно. В обоих случаях оптимален варианты переключения 2 и 3.

7. Прототип 2 отличается тем, что на концах пассивных проводников установлены SMA соединители поверхностного монтажа, а отводы расположены друг под другом и их длины равны 6 мм. Показано, что максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 16,25%, соответственно. Оптимален вариант переключения 2.

8. Прототип 3 отличается тем, что на концах пассивных проводников установлены SMA соединители, а длины отводов равны 31 мм. Показано, что максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ до и после отказов составляет 15,88%, соответственно. Оптимален вариант переключения 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования

1. Для однократного МР выполнены квазистатический анализ и экспериментальные исследования структур ПП с экранированной однослойной трассировкой с лицевой связью и длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м. Показано, что частота среза (f_{cp}) с увеличением длины структуры уменьшается от 0,125 до 0,05 ГГц. Определено, что изменение параметров структуры ПП в пределах технологических допусков может изменять первую частоту резонанса (f_0) от 1,22 до 2,17 ГГц, от 0,932 до 1,654 ГГц и от 0,516 до 0,916 ГГц, соответственно. Выявлено, что экспериментальные значения f_0 для структур с длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м отличаются от расчетных (при номинальных параметрах указанных в фотошаблоне) на 7,3, 13 и 7,4%, соответственно.

2. Разработаны прототипы измерительных ПП: с однократным МР с однослойной трассировкой с боковой связью, а также для сравнения – без МР. На прототипе ПП с МР реализована структура длиной 7 см. До и после отказов, её полоса пропускания варьируется от 2 до 2,5 ГГц, а без МР полоса 7,8 ГГц. Ослабление импульса помехи общей длительностью 150 пс в структуре с МР составляет 1,7 раза, а без МР – 1,07 раза.

3. Предложены новые способы двуслойной трассировки резервированных цепей. Они позволяют, при ослаблении помехового импульса не менее 2 раз, облегчить трассировку печатных проводников ПП.

4. Предложен способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием. Он позволяет повысить отказоустойчивость, за счет увеличения кратности резервирования, и помехозащищенность, за счёт увеличения длительности импульса помехи, который будет разлагаться полностью. Способ позволяет уменьшить амплитуду распространяющегося СШП импульса до отказов в 1,7 раза, после первого отказа – в 2 раза, а второго – 2,1 раза.

5. Для трехкратного МР детально исследован оптимальный порядок переключения после отказов на концах и вдоль проводников структур с исполнением опорного проводника в центре, в виде боковых полигонов, сверху и снизу с исходным и оптимальным наборами параметров. В результате разработан алгоритм анализа структур с трехкратным МР после отказов. На основе алгоритма выполнены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР после отказов вдоль проводников.

6. Выполнено экспериментальное исследование прототипа ПП с исполнением опорных проводников сверху и снизу с трехкратным МР. До отказов наблюдается ослабление импульса помехи в 6,3 раза. После отказов, на активный проводник влияют отражения от нагрузок на

пассивных проводниках, за счет чего выходная амплитуда меняется. Максимальное её увеличение достигает 8% от случая до отказов. В основном, изменения остаются на уровне 1,2% от случая до отказов.

7. Выполнено экспериментальное исследование прототипа ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников в центре. Формы импульсов разложения в данном случае для вариантов до и после отказов практически не отличаются, что объясняется большой длиной структуры и потерями в ЛП.

8. Разработаны три прототипа ПП с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов. Прототипы отличаются различными реализациями отводов от регулярной части до SMA соединителей. Выполнена оптимизация структуры эвристическим поиском, по двум критериям: диапазонно-временному и согласованию с трактом. В результате, оптимальный порядок переключения, обеспечивающий минимальное напряжение на выходе структуры после отказов элементов, позволяет увеличить ослабление импульса помехи на 21% после первого отказа и 13% после второго отказа.

Рекомендации

1. Изменяя длину и разность погонных задержек мод, можно оптимизировать частоту среза цепи ПП с МР под конкретный цифровой интерфейс.

2. Новые способы МР с двуслойной трассировкой могут использоваться для дальнейших исследований и возможности создания различных конфигураций устройств.

3. Новый способ двукратного модального резервирования может использоваться для обеспечения ФБ при воздействии электромагнитных помех.

4. Оптимальный порядок переключения может применяться для ослабления СШП помех в электрических цепях с трёхкратным МР.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Разработка структур с однократным МР под конкретный цифровой интерфейс.

2. Реализация РЭА на основе МР, используя новые способы с двуслойной трассировкой резервируемых проводников.

3. Детальное исследование возможности улучшения характеристик нового способа двукратного МР за счет неодинаковости каналов передачи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАЦ	Векторный анализатор цепей
КЗ	Короткое замыкание
ЛП	Линия передачи
МР	Модальное резервирование
МФ	Модальный фильтр
ИУ	Исследуемое устройство
ПП	Печатная плата
РЭА	Радиоэлектронная аппаратура
СМО	Сквозное металлизированное отверстие
СШП	Сверхширокополосный
ХХ	Холостой ход
ЭСР	Электростатический разряд
ЭМП	Электромагнитные помехи
ЭМС	Электромагнитная совместимость

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1: Общие требования. – М. : Стардартинформ, 2014. – 58 с.
- 2 ГОСТ Р ИСО 26262-1-2014 Дорожные транспортные средства функциональная безопасность. Часть 1: Термины и определения. – М. : Стардартинформ, 2015. – 20 с.
- 3 Van Waes, J. Functional Safety Standard's Techniques and Measures in Light of Electromagnetic Interference / J. Van Waes, J. Vankeirsbilck, D. Pissoort, J. Boydens // 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET) – 2017. – P. 1–4.
- 4 Armstrong, K. Why EMC Immunity Testing is Inadequate for Functional Safety // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 1. – P. 1–6.
- 5 Данилова, Е.А. Классификация дефектов печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 1. – С. 325–328.
- 6 Study of key failure modes of PTH in high density printed board and case study / Y. Bin, H. Chen, Y. Lu, D. Luo // 2014 15th International conference on electronic packaging technology. – Chengdu, China. – 2014. – P. 923–927.
- 7 Kovtun, I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // 2017 International conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo). – 2017. – P. 1–4.
- 8 Hidden functional failure detection model of electronic equipment / X. Jiang, J. Zhao, Z. Li, X. Zhang // The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC) – 2015. – P. 1960–1964.
- 9 Open circuit caused by inner-layer separation in printed circuit board / X. Huang, C. Ou, X. Huang, B. Su, W. Zhou // 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – 2016. – P. 191–194.
- 10 Amy, R.A. Board-level vibration failure criteria for printed circuit assemblies: an experimental approach / R.A. Amy, G.S. Aglietti, G. Richardson // IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing. – 2010. – Vol. 33. – P. 303–311.
- 11 Marndi, S. Design challenges in printed circuit boards for EMC compliance / S. Marndi, N. Roy // 2019 International Conference on Range Technology (ICORT). – 2019. – P. 1–4.
- 12 Wu, J. Using cut-out features for efficient printed circuit board testing and failure analysis / J. Wu, S. Ganesan // IEEE Transactions on components and packaging technologies. – 2010. – Vol. 28, no. 1. – P. 166–168.

- 13 Olatunji, T. Fabrication of copper compliant interconnects on a printed circuit board: an additive approach / T. Olatunji, M. Montazeri, D. Huitink // 2020 19th IEEE Intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems (ITherm). – 2020. – P. 1147–1151.
- 14 Zhou, Y. Discussion on failure mechanism and modeling of electrochemical migration of high density printed circuit boards in dust environment / Y. Zhou, Y. Chen, W. Lu // 2018 12th International conference on reliability, maintainability, and safety (ICRMS). – 2018. – P. 323–328.
- 15 Coppola, L. Investigation on current density limits in power printed circuit boards / L. Coppola, D. Cottet, F. Wildner // 2008 Twenty-third annual IEEE applied power electronics conference and exposition. – 2008. – P. 1–6.
- 16 Zeynali, E. Investigation of partial discharge in aircraft conformally-coated printed circuit boards / E. Zeynali, R. Bridges, B. Kordi // 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). – 2019. – P. 30–33.
- 17 Vibration failure processes evaluation of board level solder joints based on degeneration data / Y. Chen, B. Jing, Z. Sheng, F. Lu, J. Hu, S. Si // 2017 Prognostics and system health management conference (PHM-Harbin). – 2017. – P. 1–5.
- 18 A study for corrosion and false soldering failures of printed circuit board connectors / H. Xiao, Y. Li, G. Zhu, B. Zhou, Z. Chen, J. Shen // 2020 21st International conference on electronic packaging technology (ICEPT). – 2020. – P. 1–5.
- 19 Li, W. An analysis case on the failure of BGA solder joints / W. Li, X. Sun // 2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – 2017. – P. 731–734.
- 20 Du, B. Effects of low pressure on tracking failure of printed circuit boards / B. Du, Y. Liu, H. Liu // IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation. – 2008. – Vol. 15. no. 5. – P. 1379–1384.
- 21 Three possible mechanisms for the emergence of electronic device failures as a result of electromagnetic effects / L.N. Zdukhov, Yu.V. Parfenov, O.A. Tarasov, V.M. Chepelev // Technologies of electromagnetic compatibility. – 2018. – No. 2. – P. 22–34.
- 22 Tientcheu, R.T. Analysis of methods for classification of intentional electromagnetic environments / R.T. Tientcheu, D. Pouhè // 2015 International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA). – 2015. – P. 1385–1388.
- 23 Lingayat, T.D. Prediction of electrostatic discharge soft failure issue in case of a six layer PCB of a tablet using SIwave tool // 2016 IEEE International conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT). – 2016. – P. 1361–1366.

- 24 Baek, J. Recovery method of S/W failure induced by ESD using far-end crosstalk between PCB traces / J. Baek, H. Shin, S. Kim // 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – 2017. – P. 178–180.
- 25 Methodology for analyzing ESD-Induced soft failure using full-wave simulation and measurement / A. Hosseinbeig, O.H. Izadi, S. Solanki, T.D. Lingayat, B.P. Subramanya, A.K., Vaidhyathan, J. Zhou, D. Pommerenke // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. –2019. – Vol. 51. – P. 11–19.
- 26 Radasky, W. Fear of frying electromagnetic weapons threaten our data networks. Here's how to stop them // Spectrum, IEEE. – 2014. – Vol. 51. – P. 46–51.
- 27 Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System design and assessment notes. – 2014. – No. 41. – P. 1–93.
- 28 Pulkkinen, J.P. Statistical Analysis of MIL-STD-461 Emission Test Reports of Commercial Off-The-Shelf Products // 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. – 2019. – P. 410–415.
- 29 Borgeest, K. EMC and Functional Safety of Automotive Electronics / K. Borgeest. – Germany: Center of Automotive Electronics and Combustion Engines, 2018. – 250 p.
- 30 ГОСТ Р ИСО 26262-3-2014 Дорожные транспортные средства функциональная безопасность. Часть 3: Стадия формирования концепции. – М. : Стардартинформ, 2016. – 31 с.
31. Денисенко, В.В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2008. – №3. – С. 94–98.
32. Techniques and Measures to Achieve EMI Resilience in Mission- or Safety-Critical Systems / D. Pissoort, J. Lannoo, J. Van Waes, A. Degraeve, J. Boydens // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2017. – V. 6. – P 107–114.
33. Degraeve, A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination / A. Degraeve, D. Pissoort // 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). –2016. – P. 211–213.
34. Degraeve, A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room conditions / A. Degraeve, D. Pissoort // 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – 2016. – P. 374–378.
- 35 Шарафутдинов, В.Р. Способы резервирования элементов радиотехнических устройств на основе модальной фильтрации: дис. ... канд. тех. наук: 05.12.04/ Шарафутдинов Виталий Расимович. – Т., 2019. – 153 с.

36. Шарафутдинов, В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – No. 3. – С. 117–144.
37. ГОСТ 27.002–2015 Надёжность в технике. Термины и определения. – М. : Стардартинформ, 2016. – 28 с.
38. Патент РФ на изобретение №2603850. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием. Заявка №2015129253. Приоритет изобретения 16.07.2015. Опубликовано: 10.12.2016 Бюл. №34.
39. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – Т. 3 (37). – С. 129–131.
40. New Concept of Critical Infrastructure Strengthening / T.R. Gazizov, P.E. Orlov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // Proc. of the ICNAAM 2015. – 2015. – P. 1–3.
41. Orlov, P.E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, E.N. Buichkin // Proc. of the SIBCON-2016. – 2016. – P. 1–3.
42. Патент РФ на изобретение №2603851. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. Способ трассировки печатных проводников с изменением диэлектрического заполнения между ними для цепей с резервированием. Заявка №2015129263. Приоритет изобретения 16.07.2015. Опубликовано: 10.12.2016 Бюл. №34.
43. Буичкин, Е.Н. Совершенствование модальной фильтрации в новых конструкциях печатных плат с резервированием / Е.Н. Буичкин, П.Е. Орлов // Матер. XI МНПК «ЭСиСУ». – 2015. – Т. 2. – С. 18–21.
44. Белоусов, А.О. Экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в многопроводной микрополосковой линии / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2016. – No. 3 (19). – С. 51–54.
45. Патент РФ на изобретение №2603843. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. Способ резервирования для печатных плат. Заявка №2015137547. Приоритет изобретения 02.09.2015. Опубликовано: 10.12.2016 Бюл. №34.

46. Самойличенко, М.А. Влияние соединения опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двусторонней печатной плате / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники – 2021. – №. 12 – С. 1–15.
47. Samoylichenko, M.A. Comparing Electrical Characteristics of Coplanar Waveguides and Modal Filters / М.А. Samoylichenko, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2022. – P. 1–6.
48. The Design & Test of Broadband Launches up to 50 GHz on Thin & Thick Substrates [Электронный ресурс]. – Southwest Microwave, Inc., 2011. – Режим доступа: <https://mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2018/07/The-Design-and-Test-of-Broadband-Launches-up-to-50-GHz-on-Thin-and-Thick-Substrates.pdf>.
49. Optimizing Test Boards for 50 GHz End Launch Connectors [Электронный ресурс]. – Southwest Microwave, Inc., 2018. – Режим доступа: <https://mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2018/07/Optimizing-Test-Boards-for-50-GHz-End-Launch-Connectors.pdf>.
50. Utilizing Time Domain (TDR) Test Methods [Электронный ресурс]. – Southwest Microwave, Inc., 2018. – Режим доступа: <https://mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2018/07/Utilizing-Time-Domain-TDR-Test-Methods-For-Maximizing-Microwave-Board-Performance.pdf>.
51. Патент РФ на изобретение №2614156. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием. Заявка №2015137532. Приоритет изобретения 02.09.2015. Опубликовано: 23.03.2017 Бюл. №9.
52. Orlov, P.E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, E.N. Buichkin // Proc. of the SIBCON-2016. – 2016. – P. 1–3.
53. Orlov P.E. Buichkin E.N., Gazizov T.T. Method of Lay-out of Multilayer PCBs for Circuits with Redundancy / P.E. Orlov, E.N. Buichkin, T.T. Gazizov // Proc. of the EDM 2016. – 2016. – P. 155–158.
54. Шарафутдинов, В.Р. Модальное резервирование источника питания системы автономной навигации космического аппарата / В.Р. Шарафутдинов, П.Е. Орлов // Природные и интеллектуальные ресурсы сибери (СИБРЕСУРС-23-2017). – 2017. – С. 85–89.

55. Orlov, P.E. Optimization of stack parameters of a multi-layer printed circuit board for circuits with redundancy by genetic algorithm / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, V.R. Sharafutdinov // Proc. 2017 IEEE 2017 Int. multi-conf. on eng., comp. and inform. sciences. – 2017. – P. 495–500.
56. Патент РФ на изобретение №2624637. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием. Заявка №2015137548. Приоритет изобретения 02.09.2015. Опубликовано: 05.07.2017 Бюл. №19.
57. Заболоцкий, А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – No. 2(36). – С. 41–44.
58. Патент РФ на изобретение №2624465. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Куксенко С.П. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов. Заявка № 2015137546. Приоритет 02.09.2015. Опубликовано: 04.07.2017 Бюл. №19.
59. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Е.С. Жечев, Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – No. 2. – С. 162–179.
60. Патент РФ на изобретение №2663230. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах. Заявка №2017113045. Приоритет изобретения 14.04.2017. Опубликовано: 02.08.2018 Бюл. №22.
61. Шарафутдинов, В.Р. Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, no. 2. – С. 26–30.
62. Самойличенко, М.А. Оптимизация модального фильтра на двусторонней печатной плате с лицевыми и боковыми связями / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2022. – С. 95–100.
63. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov, R.S. Surovtsev, V.K. Salov, Eg.V. Lezhnin // Advances in Intelligent Systems Research (ISSN 1951-6851), proc. of the 2015 Int. Conf. on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). – 2015. P. 293–301.
64. Kuksenko, S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – p. 012110.

65. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР // С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Ключкин, А. Алхадж Хасан, А.Е. Максимов, А.В. Осинцев // *Наноиндустрия*. – 2023. – Т. 16, no. S9-1(119). – С. 170–178.
66. Orlov, P.E. Frequency Analysis of Modal Distortions and its Application to Diagnostics of Electric Connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // *Russian Physics Journal*. – 2014. – Vol. 56, no. 9. – P. 1099–1101.
67. Serpentine and Spiral Routing Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity / Y. Zhechev, A. Belousov, A. Zabolotsky, S. Vlasov, M. Murmansky, N. Pavlov, T. Gazizov // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2022. – P. 1–13.
68. Seifi, Z. Analysis and experimental study of radiative microwave pulses effects on the nonlinear performance of a low-noise amplifier / Z. Seifi, A. Ghorbani, A. Abdipour // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2021. – Vol. 49, no. 3. – P. 1105–1114.
69. Equivalent circuit model separating dissipative and radiative losses for the systematic design of efficient microstrip-based on-chip antennas / B. Sievert, J.T. Svejda, J. Wittemeier, N. Pohl, D. Erni, A. Rennings // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* – 2021. – Vol. 69, no. 2. – P. 1282–1294.
70. Kogon, A.J. An expedient approach to FDTD-based modeling of finite periodic structures / A.J. Kogon, C.D. Sarris // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2021. – Vol. 69, no. 2. – P. 1192–1204.
71. Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits / D.M. Sheen, S.M. Ali, M.D. Abouzahra, J.A. Kong // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1990. – Vol. 38, no. 7. P. 849–857.
72. Svensson, C. Time domain modeling of lossy interconnects / C. Svensson, G.H. Dermer // *IEEE Trans. Adv. Packag.* – 2001. – Vol. 24, no. 2. – P. 191–196.
73. Orlov, P. Contactless Modal Phenomena Based Approach to Detecting, Identifying, and Diagnosing of Electrical Connections / P. Orlov, T. Gazizov // *Complexity*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–12.
74. Belousov, A.O. Experimental confirmation of the modal filtration in four- and five-conductor microstrip lines / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM*. – 2017. – P. 46–49.

75. Kosteletskii, V.P. Method for experimental study of circuits with triple modal reservation in time and frequency domains / V.P. Kosteletskii, A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2022). – 2022. – P. 1–6.
76. Su, Z. Discrete-time representation of band-pass frequency-domain data for envelope transient simulation / Z. Su, T.J. Brazil // 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 2010. – P. 552–555.
77. Blackbox macro- π model with s-parameters and fast convolution / J. Schutt-Aine, J. Tan, C. Kumar, F. Al-Hawari // 2008 12th IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects. IEEE. – 2008. – P. 1–4.
78. Wang, Y. A comparison between discrete-time and vector fitting representations of s-parameter data / Y. Wang, T.J. Brazil // 2014 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMiC). – 2014. – P. 1–3.
79. Eo, Y. S-parameter-measurement-based high-speed signal transient characterization of VLSI interconnects on SIO₂-SI substrate / Y. Eo, W.R. Eisenstadt, J. Shim // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 2000. – Vol. 23, no. 3. – P. 470–479.
80. Griffith, J.M. Time-domain modeling from *S*-parameters: applicable to hard disk drives / J.M. Griffith, M.V. Toupikov // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, no. 6. – P. 3581–3586.
81. Experimental time-domain study for bandpass negative group delay analysis with lill-shape microstrip circuit / R. Vauche, R.A.B. Mefteh, F. Haddad, J. Nebhen, W. Rahajandraibe, F. Wan, B. Ravelo // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 24155–24167.
82. Medvedev, A.V. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 64, no. 4. – P. 1171–1181.
83. Medvedev, A.V. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov, Y.S. Zhechev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488, no 1. – P. 012015.
84. Medvedev, A.V. Analysis of frequency characteristics of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, no 2. – P. 022037.
85. Using *N*-norms for analysing a device with a single modal reservation / Y.S. Zhechev, A.V. Zhecheva, A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1611, no 1. – P. 012065.

86. Zhechev, Y.S. Signal integrity analysis of the structure with single modal reservation before and after failures / Y.S. Zhechev, A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2023. – Vol. 12, no. 1. – P. 69–73.
87. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system circuit with modal reservation / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov, I.F. Kalimulin // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) – 2017. – P. 244–249.
88. Orlov, P.E. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system power circuit with modal reservation / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2018. – P. 244–249.
89. Medvedev, A.V. Studying the propagation of an ultrashort pulse in a cable attached to a PCB system with modal reservation // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2021 – P. 1–4.
90. Gazizov, R.R. Using portraits of N-norms for large-scale investigation of circuits with modal reservation / R.R. Gazizov, A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // 2021 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) – 2021 – P. 1–6.
91. Газизов, Р.Р., Использование портретов N-норм для массового исследования цепей с модальным резервированием / Р.Р. Газизов, А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9. no. 3. – С. 104–109.
92. Медведев, А.В. Влияние щели в плоскости земли на волновое сопротивление многослойной печатной платы с модальным резервированием / А.В. Медведев, П.Е. Орлов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций – 2018. – No. 1. – С. 198.
93. Орлов, П.Е. Компоновка и трассировка электрических соединений в вопросах обеспечения ЭМС РЭА: обзор / П.Е. Орлов, А.В. Медведев, В.Р. Шарафутдинов // Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – 2018. – С. 46–48.
94. Медведев А.В. Методы повышения помехоустойчивости и надежности энергосистемы космического аппарата: обзор // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018» – 2018. – С. 130–133.
95. Медведев, А.В. Исследование распространения сверхкороткого импульса в системе кабель–плата с модальным резервированием // IEEE XXII Международная конференция

- молодых специалистов в области электронных приборов и материалов (EDM 2021). – 2021. – С. 172–176.
96. Медведев, А.В. Ослабление сверхкороткого импульса после отказа при модальном резервировании // XV международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» – 2019. – С. 38–41.
97. Медведев, А.В. Исследование меандровой линии на печатной плате с модальным резервированием / А.В. Медведев, А.О. Губин // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019» – Томск, Россия, 15–17 Мая 2019. – С. 21–24.
98. Медведев, А.В. Анализ задержек импульсов разложения в системе кабель–плата с модальным резервированием // Перспективы развития фундаментальных наук. сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, Россия, 21–24 апреля 2020. – С. 78–80.
99. Патент РФ на изобретение №2779536. Медведев А.В., Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников цепей питания с резервированием. Заявка №2021115972. Приоритет изобретения 03.06.21. Опубликовано: 08.09.2022 Бюл. №25..
100. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Medvedev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2020. – Vol. 12(7), no. 1117. – P. 1–38.
101. ГОСТ Р 53429-2009 Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М. : Стардартинформ, 2010. – 12 с.
102. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A.O. Belousov, A.V. Medvedev, E.B. Chernikova, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13(6), no. 1074. – P. 1–22.
103. IPC-2221A Общий стандарт на проектирование печатных плат. – М. : ЗАО Предприятие Остек, 2003. – 138 с.
104. Патент РФ на изобретение №2754077. Медведев А.В., Алхадж Хасан А., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы. Заявка №2020122269. Приоритет изобретения 06.07.2020. Опубликовано: 26.08.2021 Бюл. №24.
105. Патент РФ на изобретение №2754078. Медведев А.В., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р. Способ компоновки многослойных печатных плат для цепей с

- резервированием. Заявка №2020122293. Приоритет изобретения 06.07.20. Опубликовано: 26.08.2021 Бюл. №24.
106. Патент РФ на изобретение №2752233. Медведев А.В., Алхадж Хасан А., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной печатной плате для цепей с резервированием. Заявка №2020122274. Приоритет изобретения 06.07.20. Опубликовано: 23.07.2021 Бюл. №21.
107. Морозов, С.Р. Квазистатический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С 91–106.
108. Medvedev, A.V. Interconnect routing on two signal layers of a modal reservation PCB: a case study // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022. – P. 1–6.
109. Медведев, А.В. Оптимизация структур печатной платы с двуслойным диэлектриком на основе модального резервирования / А.В. Медведев, С.Р. Морозов // XXX Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика-2023». –2023. – С. 192.
110. Морозов, С.Р. Анализ характеристик структуры печатной платы с проводниками на внутреннем слое с модальным резервированием / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – 2022. – Т. 7. – С. 91–93.
111. Морозов, С.Р. Параметрическая и структурная оптимизация генетическим алгоритмом печатной платы с двуслойным диэлектриком / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // XX Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – 2023. – С. 28–30.
112. Морозов, С.Р. Характеристики структуры с проводниками на внешнем слое печатной платы с модальным резервированием / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР 2023». – 2023. – С. 49–51.
- 113 Патент РФ на изобретение №2752232. Медведев А.В., Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двухкратным резервированием. Заявка №2019140181. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубликовано: 23.07.2021 Бюл. №16.

- 114 Medvedev, A.V. Studying the switching order for a three-wire structure with modal reservation after failures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919(2020). – P. 1–6.
- 115 Патент РФ на изобретение №2770516. Медведев А.В., Газизов Т.Р. Способ переключения цепей с двукратным резервированием после отказов. Заявка №2021115974. Приоритет изобретения 03.06.2021. Опубликовано: 18.04.2022 Бюл. №11.
116. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A.O. Belousov, A.V. Medvedev, E.B. Chernikova, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13(6), no. 1074. – P. 1–22.
117. Methods for increasing noise immunity of radio electronic systems with redundancy / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov, T.R. Gazizov, A.V. Ubaichin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 1015(5) – P. 052022.
118. Sharafutdinov, V.R. Using modal reservation for ultrashort pulse attenuation after failure / V.R. Sharafutdinov, A.V. Medvedev // Proc. of IEEE 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, Russia, 21–27 October 2019. – P. 1–4.
119. Medvedev, A.V. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021 – Yekaterinburg, 13–14 May 2021 – P. 427–430..
120. Медведев, А.В. Ослабление сверхкороткого импульса после отказа при трехкратном модальном резервировании // 25-я Всероссийск. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС- 2019» – Томск, Россия, 19 ноября 2019. – С. 162–167.
121. Патент РФ на изобретение №2738955. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р., Медведев А.В. Способ трехкратного резервирования межсоединений. Заявка №2019138502. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубликовано: 21.12.2020 Бюл. №36.
122. Патент РФ на изобретение №2767190. Медведев А.В., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Способ переключения цепей с трёхкратным резервированием после отказов. Заявка №2021116338. Приоритет изобретения 07.06.2021. Опубликовано: 16.03.2022 Бюл. №8.
123. Monolithic MEMS T-type switch for redundancy switch matrix applications / K.Y. Chan, M. Daneshmand, A.A. Fomani, R.R. Mansour, R. Ramer // 38th European Microwave Conference. – 2008. – P. 1513–1516.

124. Медведев, А.В. Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов / А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – No 4. – С. 59–66.
125. Медведев, А.В. Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – No 2. – С 175–203.
126. Ромашов, И.П. Исследование порядка переключения цепей после отказов типовой структуры с трехкратным модальным резервированием / И.П. Ромашов, А.В. Медведев // 26-я Всероссийск. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2020» – 2020. – С. 117–122.
127. Медведев, А.В. Моделирование и экспериментальное исследование четырехпроводной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием при отказах её элементов // Доклады ТУСУР. – 2023. – No 1. – С. 48–55.
128. Medvedev, A.V. Experimental study of a structure with triple modal reservation before and after failures / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, no. 1. – P. 360–363.
129. Medvedev, A.V. Parametric optimization of double-sided printed circuit board with triple modal reservation accounting failures / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // ELECTRICA. – 2023. – Vol. 23, no. 2 – P. 338–344.
130. Гребенюк, А.В. Проектирование и изготовление тестовых печатных плат с модальным резервированием / А.В. Гребенюк, А.В. Медведев // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022». – 2022. – Ч. 1. – С. 221–224.
131. Лакоза, А.М. Разработка печатной платы с трехкратным модальным резервированием с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов / А.М. Лакоза, А.В. Медведев // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022». – 2022. – Ч. 1. – С. 224–227.
132. Медведев, А.В. Анализ защитных характеристик структуры двуслойной печатной платы из различных материалов с трехкратным модальным резервированием / А.В. Медведев, С.Р. Морозов // 28-я Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2022» – 2022. – С. 126–134.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А
(СПРАВОЧНОЕ)
КОПИИ ДОКУМЕНТОВ**



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, к.т.н., доцент

А.Г. Лоцилов

« 2 » 10 2023 г.

АКТ

использования в НИР результатов диссертационного исследования

Медведева Артёма Викторовича

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ), руководитель НИР по гранту РНФ № 19-19-00424, д.т.н., профессор Газизов Т.Р.; руководитель НИР по государственным заданиям FEWM-2020-0041 и FEWM-2022-0001, руководитель НИР по гранту РНФ № 20-19-00446, д.т.н., профессор Заболоцкий А.М., настоящим актом подтверждаем факт использования при выполнении работ в рамках НИР следующих результатов диссертационного исследования Медведева А.В.:

1. Результаты квазистатического моделирования структур с однократным модальным резервированием (научно-технический отчеты за 2019–2022 гг. по гранту РНФ № 19-19-00424 «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем»).

2. Результаты разработки прототипов с трассировкой проводников с боковой и лицевой связями на специальных измерительных печатных платах для исследования на излучаемые эмиссии и восприимчивость к излучениям (научно-технический отчет за 2022 г. по гранту РНФ № 19-19-00424 «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем»).

3. 8 новых способов модального резервирования цепей (научно-технические отчеты за 2019–2022 гг. по гранту РНФ № 19-19-00424 «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем»).

4. Результаты квазистатического моделирования структур с трехкратным модальным резервированием (научно-технические отчеты за 2020–2022 гг. по гранту РНФ № 20-19-00446 «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей»).

5. Результаты экспериментальных исследований печатных плат с трехкратным модальным резервированием до и после отказов с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов (научно-технический отчет за 2022 гг. по гранту РНФ № 20-19-00446 «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей»).

Заведующий кафедрой ТУ, руководитель НИР по государственному заданию № 8.9562.2017/БЧ, по гранту РНФ № 19-19-00424, д.т.н., профессор
Руководитель НИР по государственным заданиям FEWM-2020-0041 и FEWM-2022-0001, д.т.н., профессор

Т.Р. Газизов

А.М. Заболоцкий



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ТУСУРа, к.т.н., доцент

П.В. Сенченко

« 2 » 10 2023 г.

И.О. ПРОРЕКТОРА ПО УРД АРИОШИНА И.А.
ПО ПРИКАЗУ № 7395ЛС ОТ 29.09.2023

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационного исследования

Медведева Артёма Викторовича

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по научной работе, д.т.н., профессор Куксенко С.П. и заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе Бусыгина А.В., настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ ТУСУРа следующих результатов диссертационного исследования Медведева А.В.:

1. Результаты квазистатического анализа структур с однократным, двукратным и трехкратным модальным резервированием использованы при проведении лабораторных работ по дисциплине «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем» у студентов бакалавриата радиотехнического факультета ТУСУРа, обучающихся по направлениям подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и «Радиотехника» в 2021–2022 и 2022–2023 у.г.

2. Результаты проектирования печатных плат с однократным, двукратным и трехкратным модальным резервированием использованы при проведении лабораторных работ по дисциплине «Основы конструирования и технологии производства электронных средств» у студентов бакалавриата радиотехнического факультета ТУСУРа, обучающихся по направлениям подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и «Радиотехника» в 2022–2023 у.г.

Заместитель заведующего кафедрой ТУ по научной работе,
д.т.н., профессор кафедры ТУ



С.П. Куксенко

Заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе



А.В. Бусыгина



Акционерное общество
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»

ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск,
ЗАТО Железногорск, Красноярский край,
Российская Федерация, 662972
ОКПО 10163039; ОГРН 1082452000290
ИНН/КПП 2452034898/785050001

тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39
факс (3919) 72-26-35, 75-61-46
office@iss-reshetnev.ru
http://www.iss-reshetnev.ru

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
конструктора по электрическому
проектированию и системам
управления КА акционерного
общества «Информационные
спутниковые системы» имени
академика М.Ф. Решетнева
(АО «РЕШЕТНЁВ»),
председатель секции №2 НТС,
К.Т.Н., доцент



С.Г. Кочура
2023 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Медведева Артёма Викторовича

Комиссия в составе:

- главного конструктора - начальника отделения проектирования и испытаний РЭА АО «РЕШЕТНЁВ», к.т.н. И.Н. Тульского;
 - начальника отдела АО «РЕШЕТНЁВ», к.т.н. С.Б. Сунцова;
 - заместителя начальника отдела АО «РЕШЕТНЁВ» М.М. Иванова
- составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «РЕШЕТНЁВ» следующих результатов диссертационной работы А.В. Медведева:

– результаты квазистатического моделирования распространения сверхкороткого импульса в цепях блока цифровой обработки сигнала в системе автономной навигации космического аппарата и в цепях источника питания системы автономной навигации космического аппарата. Эти результаты отражены в отчете по этапу 3 по проекту «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов», выполненному 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.

Указанные результаты позволили оценить ослабление импульсной помехи в цепях с модальным резервированием;

– результаты аналитического обзора по влиянию пространственного разнесения на обеспечение ЭМС резервированных систем. Эти результаты отражены в томе 3 отчета по этапу 1 того же проекта.

Указанные результаты позволили оценить возможности использования различных подходов к компоновке и трассировки цепей с резервированием для обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при воздействии электромагнитных помех.

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


И.Н. Тульский

Начальник отдела АО «РЕШЕТНЁВ»,
к.т.н.


С.Б. Сунцов

Заместитель начальника отдела
АО «РЕШЕТНЁВ»


М.М. Иванов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2752232

**СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ
ПРОВОДНИКОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ
ДИЭЛЕКТРИКОМ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С ДВУКРАТНЫМ
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ**

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2019140181

Приоритет изобретения 09 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 июля 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 декабря 2039 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2738955

СПОСОБ ТРЁХКРАТНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ
МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

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

Авторы: *Шарафутдинов Виталий Расимович (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Медведев Артем Викторович (RU)*

Заявка № 2019138502

Приоритет изобретения 27 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 декабря 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 ноября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2752233

**СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ
ПРОВОДНИКОВ НА ДВУСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ
ПЛАТЕ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ**

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Алхадж Хасан Аднан (SY), Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2020122274

Приоритет изобретения **06 июля 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **23 июля 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **06 июля 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2754077

**СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ
ПРОВОДНИКОВ ЦЕПЕЙ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ НА
ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ СТОРОНАХ ПЕЧАТНОЙ
ПЛАТЫ**

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Алхадж Хасан Аднан (SY), Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2020122269

Приоритет изобретения 06 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 26 августа 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 06 июля 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2754078

СПОСОБ КОМПОНОВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2020122293

Приоритет изобретения 06 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 26 августа 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 06 июля 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2767190

СПОСОБ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЦЕПЕЙ С
ТРЕХКРАТНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПОСЛЕ
ОТКАЗОВ

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Заблоцкий Александр Михайлович (RU)*

Заявка № 2021116338

Приоритет изобретения 07 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 марта 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 07 июня 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e4dbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2770516

СПОСОБ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЦЕПЕЙ С
ДВУКРАТНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПОСЛЕ
ОТКАЗОВ

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2021115974

Приоритет изобретения **03 июня 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **18 апреля 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **03 июня 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779536

СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ
ПРОВОДНИКОВ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ С
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

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

Авторы: *Медведев Артём Викторович (RU), Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2021115972

Приоритет изобретения 03 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 08 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 03 июня 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



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



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

Диплом I степени

награждается

Медведев А.В.

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

20 - 22 ноября 2019 г.

Секция 12 «Электромагнитная совместимость»

Председатель конференции

Президент ТУСУРа

А.А. Шелупанов

**Председатель организационного
комитета конференции**

Ректор ТУСУРа

В.М. Рулевский

СВИДЕТЕЛЬСТВО

**Медведев
Артем Викторович**

Аспирант кафедры телевидения и управления,
за высокие достижения в научно-исследовательской деятельности
включен в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРА

Ректор



В.М. Рулевский

Проректор по НРИИ

А.Г. Лоцилов

21 декабря 2022 г.