

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

На правах рукописи



Шарафутдинов Виталий Расимович

Способы резервирования элементов радиотехнических устройств
на основе модальной фильтрации

Специальность 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д-р. техн. наук, доцент

Газизов Тальгат Рашитович

Томск 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Обзор задач повышения надежности и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры	10
1.1 Актуальность	10
1.2 Резервирование.....	11
1.3 Электромагнитная совместимость межсоединений	20
1.4 Модальная фильтрация.....	23
1.5 Цель и задачи исследования.....	30
2 Способы модального резервирования.....	33
2.1 Суть способов	33
2.2 Однократное резервирование	34
2.2.1 Способ трассировки печатных проводников.....	35
2.2.2 Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком	37
2.2.3 Способ резервирования для печатных плат.....	39
2.2.4 Способ компоновки печатных плат.....	41
2.2.5 Способ внутренней компоновки печатных плат	44
2.2.6 Способ резервирования плоских кабелей	47
2.3 Трехкратное резервирование	48
2.3.1 Способ резервирования для многослойных печатных плат.....	49
2.3.2 Способ резервирования для двухсторонних печатных плат.....	51
2.4 Специфика, достоинства и недостатки способов модального резервирования	53
2.5 Основные результаты раздела	57
3 Реализация модального резервирования	60
3.1 Компоненты для модального резервирования	60
3.1.1 Использование специальных компонентов	60
3.1.2 Способ компоновки неформованных компонентов.....	65

3.2 Модальное резервирование в системе автономной навигации космического аппарата	67
3.2.1 Блок цифровой обработки сигнала	67
3.2.2 Радиоприемное устройство	70
3.2.3 Источник питания.....	72
3.2.4 Выводы	75
3.3 Квазистатическое моделирование распространения сверхкороткого импульса.....	75
3.3.1 Блок цифровой обработки сигнала	75
3.3.2 Источник питания.....	87
3.4 Экспериментальные исследования модального резервирования	95
3.4.1 Обоснование конструкции макета	95
3.4.2 Оптимизация параметров макета	100
3.4.3 Разработка макета.....	109
3.4.4 Электродинамическое моделирование.....	113
3.4.5 Измерения.....	116
3.4.6 Сравнение результатов моделирования и измерений.....	121
3.5 Основные результаты раздела	123
Заключение	124
Список сокращений и условных обозначений	125
Список литературы	127
Приложение	143

Введение

Актуальность работы

Важной задачей проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение заданной надежности их функционирования. Существует ряд общих методов повышения надежности, среди которых особое место занимает резервирование, широко применяемое для повышения надежности основных и критически важных узлов РЭА. Большой вклад в его исследования внесли Денисенко В.В., Золотова Т.М., Кербников Ф.И., Козлов Б.А., Логинов И.С., Розенблат М.А., Русанов В.Н. Но существенное увеличение сложности, стоимости, габаритов и массы РЭА при таком способе повышения надежности ограничивает его применение.

С ростом сложности РЭА обостряется проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Особенно это важно для критичной РЭА, например бортовой. Так, с развитием технологий растет плотность компоновки и монтажа печатных плат (ПП) бортовой РЭА. Наблюдается рост верхней частоты спектра используемых сигналов. Это вынуждает уделять более пристальное внимание ЭМС бортовой РЭА и ее надежности. Отсутствие этого может привести, например, к утрате космического аппарата (КА), повлечь большие финансовые потери и подорвать репутацию разработчика-изготовителя. Возможны и преднамеренные силовые электромагнитные воздействия, в частности, мощные импульсы вплоть до субнаносекундного диапазона – сверхкороткие импульсы (СКИ). В силу широкого спектра и малой длительности они способны проникать в РЭА, а существующие сетевые фильтры не могут гарантированно защитить от них. Существуют промышленные устройства с эффективной защитой от СКИ, но существенные габариты и стоимость значительно сокращают область их применения. Более распространенные устройства защиты от помех обладают рядом недостатков. Основные из них – ограниченный ресурс, малая мощность, недостаточное быстродействие и различные паразитные параметры. ЭМС критичной РЭА активно исследуется под

руководством Л.Н. Кечиева, С.А. Сухорукова, В.Е. Фортова, J.L. ter Haseborg, F. Rachidi, E. Schamiloglu и др.

Существует принцип защиты, использующий модальное разложение сигнала в отрезках связанных линий и называемый модальной фильтрацией. Значительный вклад в исследования устройств защиты на ее основе, называемых модальными фильтрами (МФ), внесли Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и И.Е. Самотин. МФ отличаются радиационной стойкостью, малой массой и дешевизной.

Используя модальную фильтрацию и избыточность холодного резервирования, можно осуществить модальное резервирование (МР), под которым понимается использование резервируемых цепей совместно с резервирующими их цепями холодного резервирования для осуществления модальной фильтрации. Первые исследования МР начали Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов и Е.Н. Буичкин. Однако его реализация в РЭА практически не рассматривалась. Между тем это актуально для ЭМС резервируемой РЭА.

Цель работы – повысить надежность и помехозащищенность РЭА. Для ее достижения надо предложить новые способы резервирования и показать их реализуемость.

Научная новизна

1. Предложены 6 способов однократного резервирования, отличающихся образованием резервируемым и резервным проводниками связанной линии передачи в неоднородном диэлектрическом заполнении.

2. Предложены 2 способа трехкратного резервирования, отличающихся образованием резервируемым и резервными проводниками многопроводных линий передачи в неоднородном диэлектрическом заполнении и зеркальной симметрией поперечного сечения по двум осям.

3. Предложен способ компоновки неформованных компонентов, отличающийся их размещением друг под другом и формовкой выводов

резервируемых компонентов в одном направлении относительно плоскости корпуса компонента, а резервных – в обратном.

4. Введены новые термины: однократное модальное резервирование и трехкратное модальное резервирование.

Теоретическая значимость

1. Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования, в т.ч. квазистатический анализ, метод моментов, модифицированный узловый метод, оптимизация генетическим алгоритмом, экспериментальные методы измерения характеристик.

2. Представлена эволюция способов модального резервирования в виде линий развития.

Практическая значимость

1. На 8 способов получены патенты на изобретение.

2. Открыта возможность комплексного и эффективного развития модального резервирования для повышения надежности и обеспечения ЭМС критичной РЭА.

3. Результаты работы использованы в ходе научно-исследовательских работ (НИР) по двум грантам Российского научного фонда (РНФ), проекту федеральной целевой программы (ФЦП), проектной и базовой частям государственного задания, а также в учебном процессе ТУСУРа.

Методология и методы исследования

В работе применены компьютерное моделирование, квазистатический подход, электродинамический анализ, теория линий передачи и генетический алгоритм.

Положения, выносимые на защиту

1. Способы однократного модального резервирования обеспечивают возможность разложения помехового импульса на 2 импульса.

2. Способы трехкратного модального резервирования обеспечивают возможность разложения помехового импульса на 4 импульса.

3. Предложенный способ компоновки неформованных компонентов сохраняет длину отрезков связанных линий, образованных одноименными трассами резервной и резервируемых цепей в области трассировки выводов, не усложняя трассировки увеличенной длиной одной из трасс.

Достоверность результатов подтверждена их сравнением с результатами, полученными измерением и в других программных продуктах.

Использование результатов

1. НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, проект №8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

2. НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РФФИ №14-19-0123200424, 2014–2016 гг.

3. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности, проект №8.9562.2017/БЧ, 2017–2019 гг.

4. 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», соглашение о предоставлении субсидии №14.574.21.0172 от 26.09.2017, 2017–2020 гг.

5. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грантовое соглашение №19-19-00424 от 30.04.2019, 2019–2021 гг.

6. Учебный процесс бакалавриата и магистратуры ТУСУРа.

Апробация результатов

Результаты докладывались на конференциях:

1. Научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2015, 2016 г.

2. Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2016, 2017 г.

3. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018 г.

4. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2018 г.

5. Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2016 г.

6. Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM, Эрлагол, Республика Алтай, 2017, 2018 г.

7. Международная конференция «Информационные технологии в бизнесе и промышленности», ТПУ, г. Томск, 2018 г.

8. Международная мульти-конференция по инженерным, компьютерным и информационным наукам СИБИРКОН, г. Новосибирск, 2017 г.

Результаты исследований позволили подготовить в 2017 г. заявки, победившие в конкурсах грантов РФФИ и ФЦП.

Публикации. По результатам исследования опубликованы 22 работы (2 без соавторов), в т. ч. 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 4 статьи в зарубежном журнале (индексируемом в Scopus и Web of Science), 6 докладов в трудах конференций (индексируемых в Scopus и Web of Science), 2 тезисов в трудах отечественной конференции, 8 патентов на изобретение.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 3 главы, заключение, список литературы из 93 наим. и приложение. Объём диссертации – 153 с.

Личный вклад. Результаты, сформулированные в выносимых на защиту положениях и составляющие научную новизну работы, получены автором лично. Вклад автора состоит в обосновании практической реализуемости запатентованных способов и подготовке основных публикаций по тематике диссертации. Исследования и квазистатическое моделирование распространения СКИ в проводниках ПП, в т.ч. с применением оптимизации, выполнены совместно с П.Е. Орловым и А.В. Медведевым. Некоторые результаты исследований получены совместно с соавторами опубликованных работ.

Краткое содержание работы. В разделе 1 выполнен обзор задач повышения надежности и обеспечения ЭМС РЭА. В разделе 2 представлены способы однократного и трехкратного МР. В разделе 3 рассмотрена реализация МР. В заключении сделаны выводы по работе. Далее приведён список литературы. В приложении приведены копии подтверждающих документов.

1 Обзор задач повышения надежности и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры

1.1 Актуальность

С ростом технического прогресса возрастает сложность технических систем, и все труднее обеспечить необходимую надежность только за счет повышения качества компонентов системы. Надежность компонентов, несмотря на все принимаемые меры, вплоть до появления деталей, работа или изготовления которых основаны на совершенно новых, неизвестных ранее технических принципах, никак не может "угнаться" за ростом сложности систем, что отмечалось уже полвека назад [1]. Сравнивая требования, которые предъявлялись к радиотехническим системам ранее и сегодня, можно установить причины и непрерывного усложнения систем, и их относительно невысокой надежности. Тенденция опережающего роста сложности систем по сравнению с тем, который был бы допустим, исходя из темпов повышения качества ее компонентов, тоже закономерна. Проблема ее состоит в общечеловеческом соизмерении "наличия" и "запросов". Однако сложные устройства нам нужны уже сейчас. Таково требование научно-технического прогресса. Одним из путей разрешения названного противоречия является введение в устройство избыточности.

Осознание необходимости избыточности для обеспечения высокой надежности приходит при рассмотрении примеров из природы. Именно избыточности обязаны своим существованием чрезвычайно сложные и, тем не менее, высоконадежные устройства – живые организмы. Один из основных видов избыточности – структурная избыточность или, по простому, резервирование. Как только обозначается проблема обеспечения надежности и безопасности функционирования достаточно сложных, либо малонадежных устройств, так всегда одним, если не единственным, средством решения этой проблемы являлось резервирование. Но оно кратно повышает стоимость и массу устройства.

Увеличивается общая сложность системы, что также ведет к проблемам ЭМС. Обеспечение ЭМС также ведет к росту массы, стоимости и сложности устройства.

Таким образом, повышение надежности за счет резервирования РЭА с учетом обеспечения ЭМС является актуальной задачей.

1.2 Резервирование

В данном разделе рассмотрены общие принципы резервирования, представлены обзор исследований по резервированию и краткие результаты патентного поиска.

Основная идея резервирования заключается в применении дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов [2]. В основе резервирования лежит очевидная идея замены отказавшего элемента исправным, находящимся в резерве. Однако реализация этой идеи часто становится достаточно сложной, если необходимо обеспечить минимальное время перехода на резерв и минимальную стоимость оборудования при заданной вероятности безотказной работы в течение определённого времени (наработки).

Для замены отказавшего элемента достаточно иметь резервный (запасной) элемент на складе. Однако продолжительность ручной замены составляет единицы часов, что для многих систем недопустимо долго. Сократить время вынужденного простоя позволяет применение контроллеров и модулей ввода-вывода с разъёмными клеммными соединителями и с возможностью «горячей» замены [3] при условии наличия развитой системы диагностики неисправности. Для обеспечения «горячей» замены необходимо предусмотреть следующее:

- 1) защиту от статического электричества, которое может возникать на теле оператора, выполняющего замену устройства;

- 2) необходимую последовательность подачи напряжений питания и внешних сигналов (для этого используют, например, соединители с контактами разной длины и секвенсоры внутри устройства);

3) защиту системы от броска тока, вызванного зарядом ёмкостей подключаемого устройства, например, с помощью токоограничительных резисторов или отдельного источника питания;

4) защиту устройства от перенапряжения, короткого замыкания, переполюсовки, превышения напряжения питания, ошибочного подключения.

Кроме того, для обеспечения «горячей» замены программируемые устройства должны быть заранее запрограммированы, в сетевые устройства должен быть записан правильный адрес и предусмотрена подсистема автоматической регистрации нового и исключения старого устройства из сети, а в алгоритмах автоматического регулирования должен быть предусмотрен «безударный» режим смены контроллера или модулей ввода вывода [4].

Если резервный элемент входит в состав системы (а не лежит, скажем, на складе), то она относится к резервированным системам с ручным замещением отказавшего элемента. По-другому построены системы резервирования с голосованием, где невозможно выделение основных элементов и резервных, поскольку все они равноправны, работают одновременно и выполняют одну и ту же функцию [5]. Выбор одного сигнала из нескольких осуществляется схемой голосования, которая в частном случае нечётного числа голосов называется мажоритарной схемой. Системы с голосованием не требуют контроля работоспособности элементов для своего функционирования, но используют подсистему диагностики для сокращения времени восстановления отказавших элементов. Наличие подсистемы диагностики снижает также вероятность накопления скрытых неисправностей, которые со временем могут явиться причиной отказа. Пример схемы голосования 2oo3 (2-out-of-3) на примере резервирования датчиков представлен на рисунке 1.1.

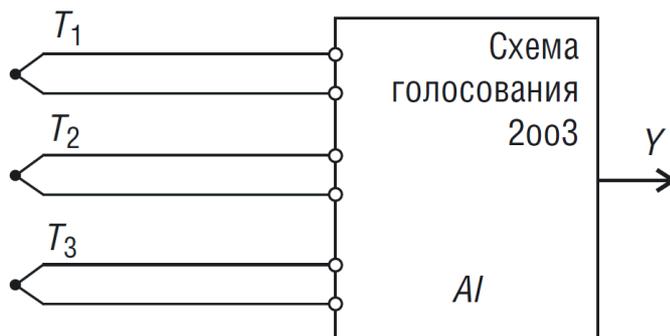


Рисунок 1.1 – Устройство с голосованием по схеме 2003

При отказе одного из элементов резервированной системы безопасности 2003 её уровень безопасности понижается, и она может начать функционировать как система 1002. Если замена неисправного элемента не произведена и произошёл второй отказ, то система переходит в режим без резервирования 1001, однако в этом режиме система не может находиться долго по требованиям безопасности. Очередность перехода от одной схемы резервирования к другой называется схемой деградации.

Резервирование является практически единственным и широко используемым методом кардинального повышения надежности систем. Однако, за резервирование приходится расплачиваться значительным увеличением габаритов, массы и потребляемой мощности, а так же усложнением проверки аппаратуры и её обслуживания. Основным параметром резервирования является его кратность – отношение числа резервных устройств к числу рабочих (основных) устройств. Кратность резервирования ограничена жесткими пределами в отношении массы, габаритов и потребляемой мощности [5]. Резервирование уменьшает полезную нагрузку на аппаратуру и увеличивает ее себестоимость [6].

Общеизвестным путем повышения надежности является холодное резервирование, когда при отказе функционирующей цепи подается питание на другую, не задействованную ранее. При работе одной схемы другая не используется и почти не оказывает влияния на её работу. При отказе одной начинает работать другая. Пример резервируемой и резервирующей схем,

расположенных рядом на одной стороне ПП, симметрично относительно вертикальной оси показан в 3D-виде на рисунке 1.2, а реального блока с их расположением на разных сторонах металлического основания – на фотографиях рисунка 1.3.

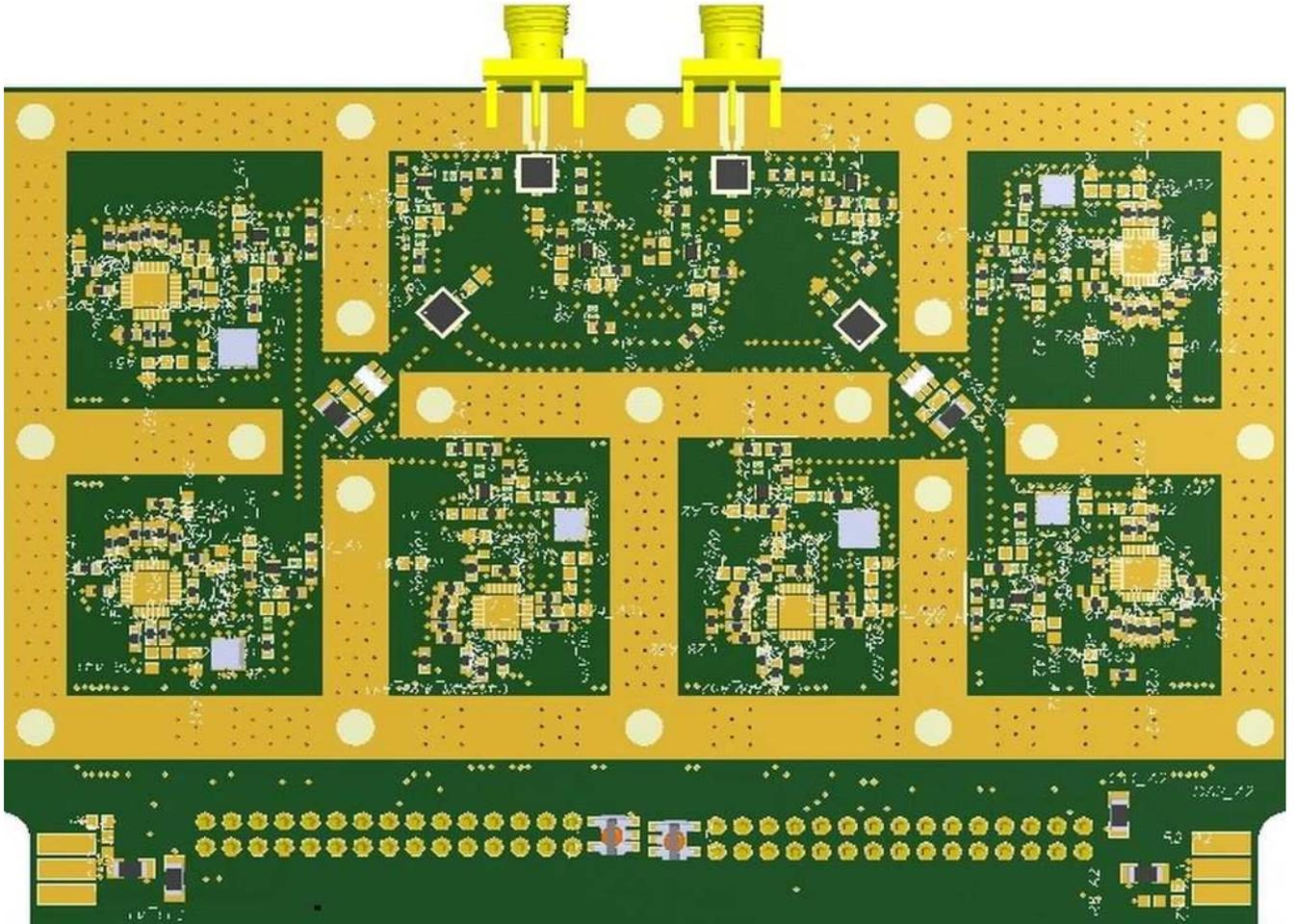
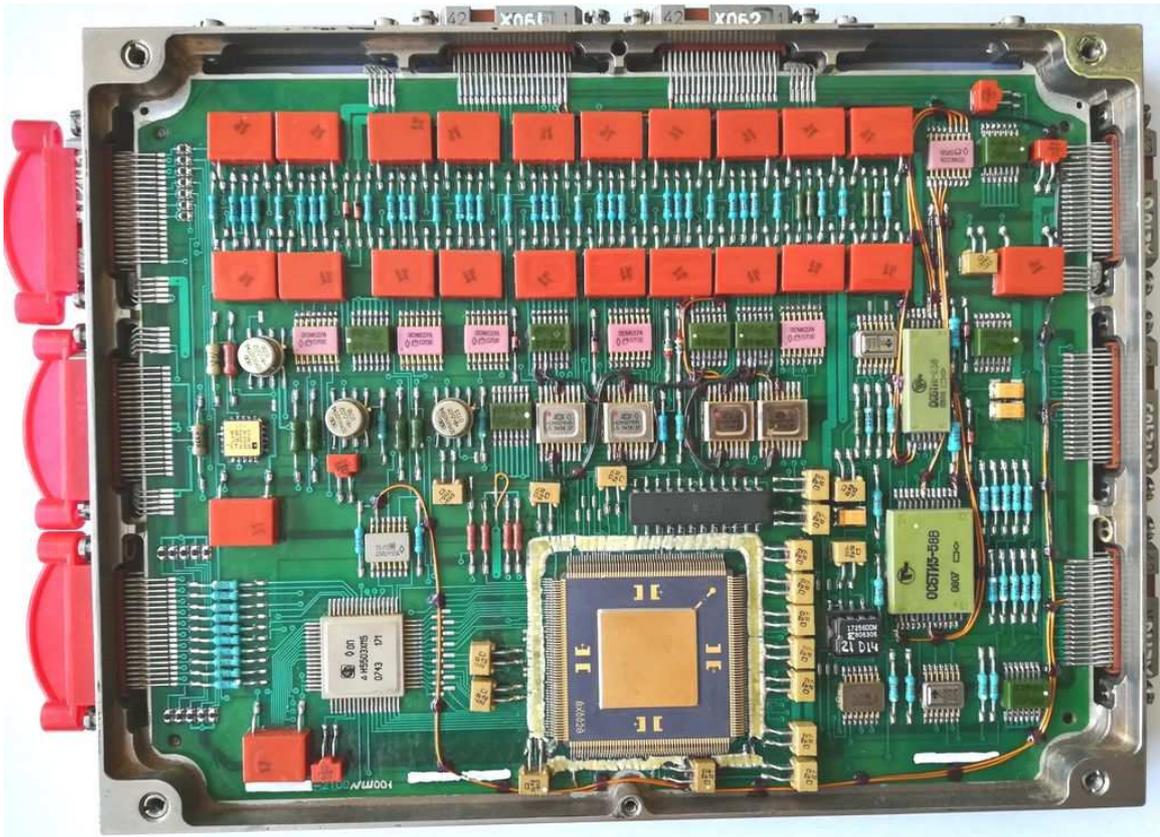
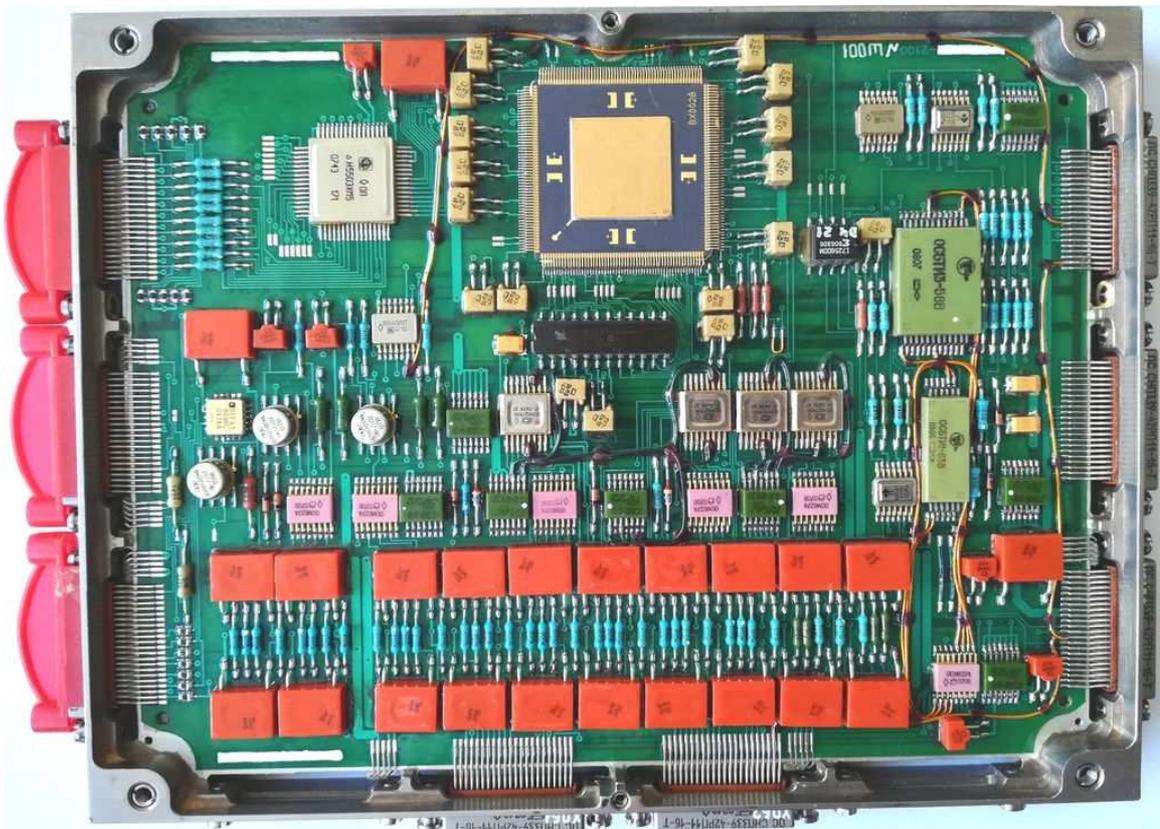


Рисунок 1.2 – 3D-вид резервируемой и резервной схем
на одной стороне печатной платы



а



б

Рисунок 1.3 – Фотографии резервируемой и резервной печатных плат на сторонах А (а) и Б (б) основания

Исследования по резервированию активно ведутся как отечественными, так и зарубежными исследователями.

В работе [7], на примере бортовых систем управления летательных аппаратов, показано, что на ранних этапах проектирования целесообразно сосредоточить усилия на качественных и количественных оценках критичных «слабых мест» в проектных решениях. В работе [8] описывается методология количественной оценки отказоустойчивости критически важных систем безопасности с функциональной избыточностью. Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной надежности промышленных электроприводов посредством их резервирования и описаны методы и конкретные примеры схемотехнических решений, которые могут использоваться для резервирования электроприводов постоянного и переменного токов [9].

Рассмотрены бортовые вычислительные системы с мажоритарией, показаны преимущества самодиагностируемых бортовых вычислительных систем с резервированием замещением (закрывающиеся в том, что они одновременно обладают улучшенными характеристиками в части отказоустойчивости, сбоеустойчивости, надежности, радиационной стойкости, энергопотребления, массы и габаритов) и возможности их реализации на отечественной элементной базе [10]. Проведен краткий обзор методов структурной избыточности, используемых при построении вычислительных систем, и предложена структура самодиагностируемой трехканальной вычислительной системы с резервированием замещением применительно к использованию современной отечественной элементной базы [11].

Рассмотрены вопросы, связанные с выбором оптимальных временных и электрических режимов резервирования критических узлов бортовой аппаратуры с целью увеличения срока активного существования КА, и влияние резервирования на повышение стойкости бортовой аппаратуры к дозовым эффектам и эффектам одиночных событий в условиях длительного воздействия ионизирующих излучений космического пространства [12]. Представлена

реализация модуля резервирования основных линий связи систем управления космического аппарата, которая включает в себя алгоритмы самодиагностики, резервирование коммутационных средств и программы восстановления после экстренного завершения работы [13].

Рассмотрен синтез схемы мажоритарного элемента, сопоставимого по вероятности отказа узлов с мажоритарным резервированием с обычным постоянным резервированием [14]. Работа [15] посвящена методам повышения отказоустойчивости одного из ключевых компонентов микросистемы (устройства управления) за счет введения управляемой структурной избыточности. В работе [16] предлагается аналитический метод, основанный на диаграммах двоичных решений для анализа комбинаторной надежности необслуживаемых систем с холодным резервированием. В работе [17] проанализировано влияние эффектов распределения нагрузки, возникающих при внутреннем компоненте холодной избыточности для системы мостовой структуры. Работа [18] посвящена проблеме формализации и анализу ошибок I и II типа переключения на резерв в системах с горячим и холодным резервированием.

В ряде работ рассмотрена задача распределения избыточности (ЗРИ) в последовательно-параллельных структурах. Так, в работе [19] рассмотрена ЗРИ, относящаяся к гетерогенным последовательно-параллельным системам k из n . В работе [20] рассмотрена ЗРИ в нередуцируемых последовательно-параллельных системах с холодным режимом ожидания. Гетерогенные отказоустойчивые системы 1 из n систем рассматриваются в [21]. В работе [22] изучался возможный компромисс между конфигурацией восстанавливаемой системы k из n систем и стратегией ее технического обслуживания.

В работе [23] рассмотрены различные схемы резервирования на микроспутнике X-Sat, чтобы убедиться в достижении трехлетнего срока службы: резервирование для работы с одноточечным отказом реализовано на всем X-Sat, будь то горячее, холодное или k/n резервирование, а если избыточность невозможна в подсистеме или на агрегатном уровне, то в некоторой форме она

реализована на уровне компонентов или частей. В работе [24] обоснована необходимость исследования пространства проектных решений для выбора конфигураций избыточности, имеющих разные уровни надежности, поскольку каждая конфигурация избыточности требует компромисса для таких факторов, как использование площади, задержка и динамическое энергопотребление конструкции. В работе [25] представлена защищенная система-в-корпусе (безопасная электронная ПП, предназначенная для критически важных приложений), которая управляет аналого-цифровым преобразователем и оперативной памятью с тройным резервированием, каналом RS-232 и интерфейсом CAN с двойным резервированием в дополнение к другим периферийным устройствам. В работе [26] предложена надежная вычислительная модель фазированных систем с холодным замещением и их компонентами, которые имеют два состояния, а вероятность отказов компонентов подчиняется экспоненциальному распределению.

В работе [27] рассмотрена подходящая гибридная система распределения AC/DC питания на борту перспективных КА, для повышения надежности и оперативной гибкости которой предложено резервирование источников. В работе [28] описана специальная топология кольцевой шины питания космического аппарата для максимального повышения её работоспособности. В работе [29] приведена оптимальная топологическая структура системы источника питания и распределения электропитания КА, способная увеличить избыточность шины питания без увеличения общей выходной мощности.

Свежим примером отечественных исследований стал ряд докладов, представленных в 2018 г. на конференции «НПЦ «Полюс», г. Томск. Так, обсуждалось обеспечение надежности бортовой аппаратуры КА [30]. Предложены рекомендации по проектированию печатных плат (ПП) для обеспечения защиты космической аппаратуры от возникновения и развития дугового разряда [31]. Представлен прибор с микропроцессорным устройством управления системой электропитания с резервированием на два отказа, главными

преимуществами которого являются высокая надежность и отказоустойчивость [32]. Предложен метод резервирования силового преобразователя, имеющего в составе не менее трех силовых блоков и совмещающего два классических метода резервирования (постоянного и замещением) [33].

Рассмотрим результаты патентных исследований, цель которых состояла в выявлении технических решений, касающихся резервирования для повышения надежности радиоэлектронных систем (в т.ч. электрических соединений). Для поиска выбраны ключевые фразы «trace redundancy» и «trace reservation». Проведенный патентный поиск в БД USPTO показал почти полное отсутствие запатентованных устройств и конструкций для обеспечения ЭМС в цепях с резервированием трасс. Но из его результатов выделен ряд следующих патентов.

Предложены блок электрических предохранителей с функциями резервирования и способ его работы [34]. Предложен преобразователь постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), имеющий множество резервных каналов, подающих сигналы ШИМ на селектор, выходное напряжение которого контролирует регулируемое выходное напряжение постоянного тока [35]. Предложен метод защиты от кондуктивных эмиссий путем чередующихся между собой слоев подложек с низкой проводимостью со слоями подложек из тонкого изолирующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью [36]. Предложен метод определения кратности резервирования для использования в интегральных схемах памяти [37]. Предложено полупроводниковое запоминающее устройство с резервированной схемой и методом тестирования, позволяющим увидеть, используются ли в нем избыточные схемы [38]. Предложены электрическая сеть транспортного средства с двумя устройствами аккумуляирования энергии, способ управления ею и средства для их осуществления [39]. Предложена электрическая сеть транспортного средства, по крайней мере, с одним резервным компонентом [40]. Предложены резервируемая электрическая сеть летательного аппарата и способ ее работы [41]. Предложена сеть с множеством узлов, имеющая два комплекта

тиристоров [42]. Предложено устройство резервирования в электроустановках высокого напряжения [43]. Предложены метод и устройство для контроля выключателя цепи в сетях электропитания, в которых один участок сети контролируется в отношении возникновения неисправностей [44].

1.3 Электромагнитная совместимость межсоединений

В данном разделе приведен обзор исследований по распространению сигналов в связанных межсоединениях и рассмотрены новые способы повышения помехоустойчивости радиоэлектронных систем с резервированием.

Рассмотрено определение путей распространения помехи с использованием метода модуляции источника помехи [45]. Предложен эффективный метод подавления помех по питанию с использованием пар переходных отверстий цепи земля-питание в многослойных ПП [46]. Выполнено моделирование уменьшения перекрестных помех для быстродействующих цифровых схем благодаря защитной трассе между связанными полосковыми линиями, короткозамкнутой на одном конце и на холостом ходу на другом [47]. Предложен способ изгиба дифференциальной линии передачи с компенсирующей индуктивностью для эффективного подавления синфазной помехи [48]. Получено соотношение уровня помех и импеданса сети питания для наихудшего случая [49]. Исследовано уменьшение синфазных и дифференциальных помех с использованием дифференциального сигнала с задержкой [50]. Исследовано использование линий со ступенчатым импедансом для уменьшения синфазной помехи в согнутых связанных линиях передачи [51]. Предложена новая структура линии передачи для быстродействующих медных межсоединений с высокой плотностью монтажа, в которой используется уникальная комбинация диэлектрических материалов с высокими и низкими значениями диэлектрической проницаемости для изоляции металлических экранов от соседних сигнальных пар, а также поглощающий материал для подавления резонансов перекрестных помех, которые могут возникать из-за перепадов сигнала [52].

В работах [53] и [54] рассмотрено влияние пространственного разнесения печатных проводников на помехозащищенность резервированных систем. Сравнивались 4 различные геометрии ПП: система без резервирования, содержащая одну трассу на ПП, система с резервированием, состоящая из трех параллельных трасс на одной ПП, система с резервированием, содержащая три непараллельных трассы на одной ПП, и система с резервированием, содержащая три различно ориентированные ПП (рисунок 1.4). Все ПП с резервированием были системами с мажоритарным резервированием по принципу «2 из 3». Рассмотрено влияние напряженности поля падающей плоской волны на вероятность битовой ошибки (рисунок 1.5). Показано, что только при использовании трех различно ориентированных ПП достигается значительное уменьшение вероятности битовой ошибки.

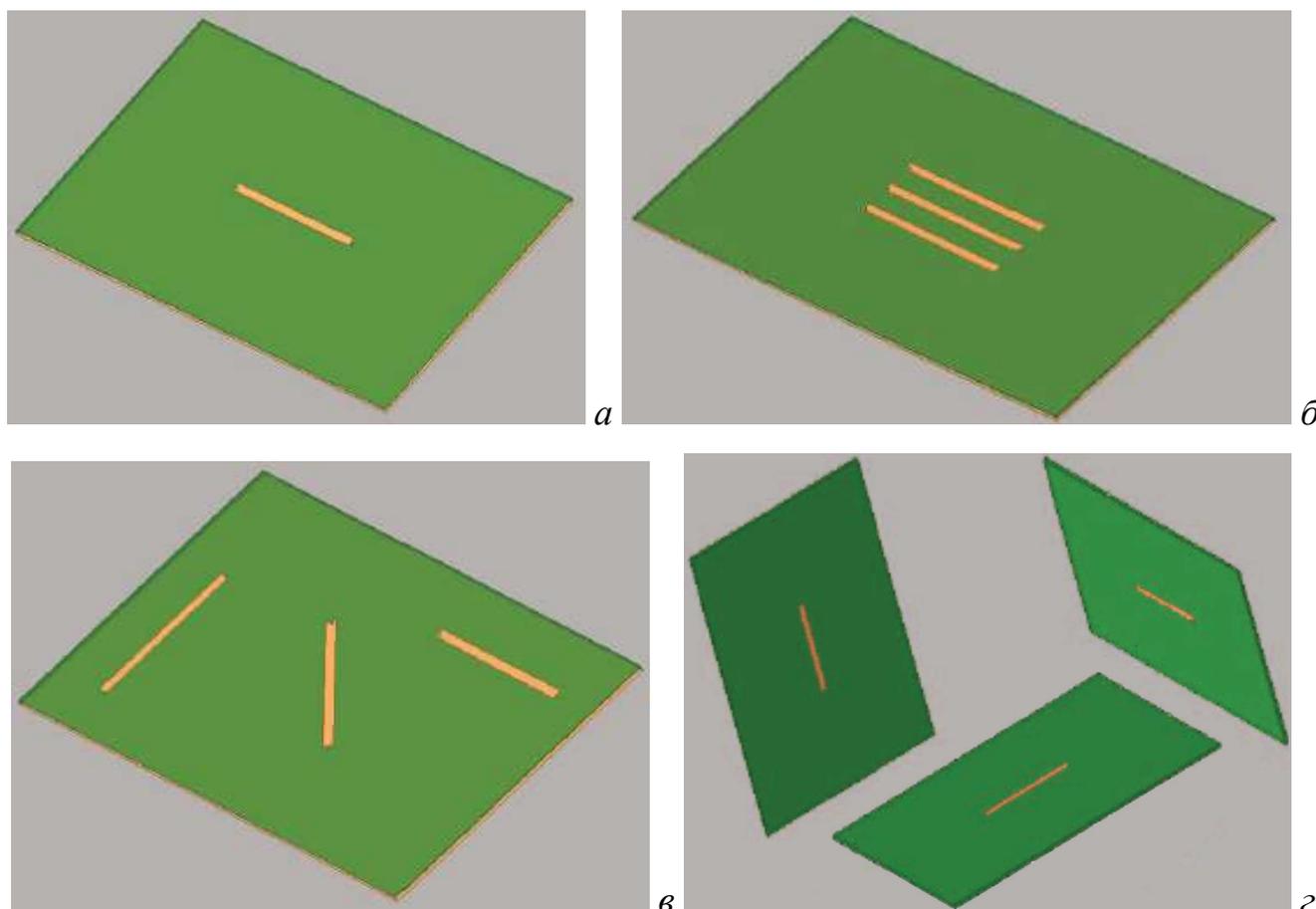


Рисунок 1.4 – Геометрии ПП: одна трасса без резервирования (*а*);
 три параллельные трассы (*б*); три непараллельные трассы (*в*);
 три непараллельные ПП (*г*)

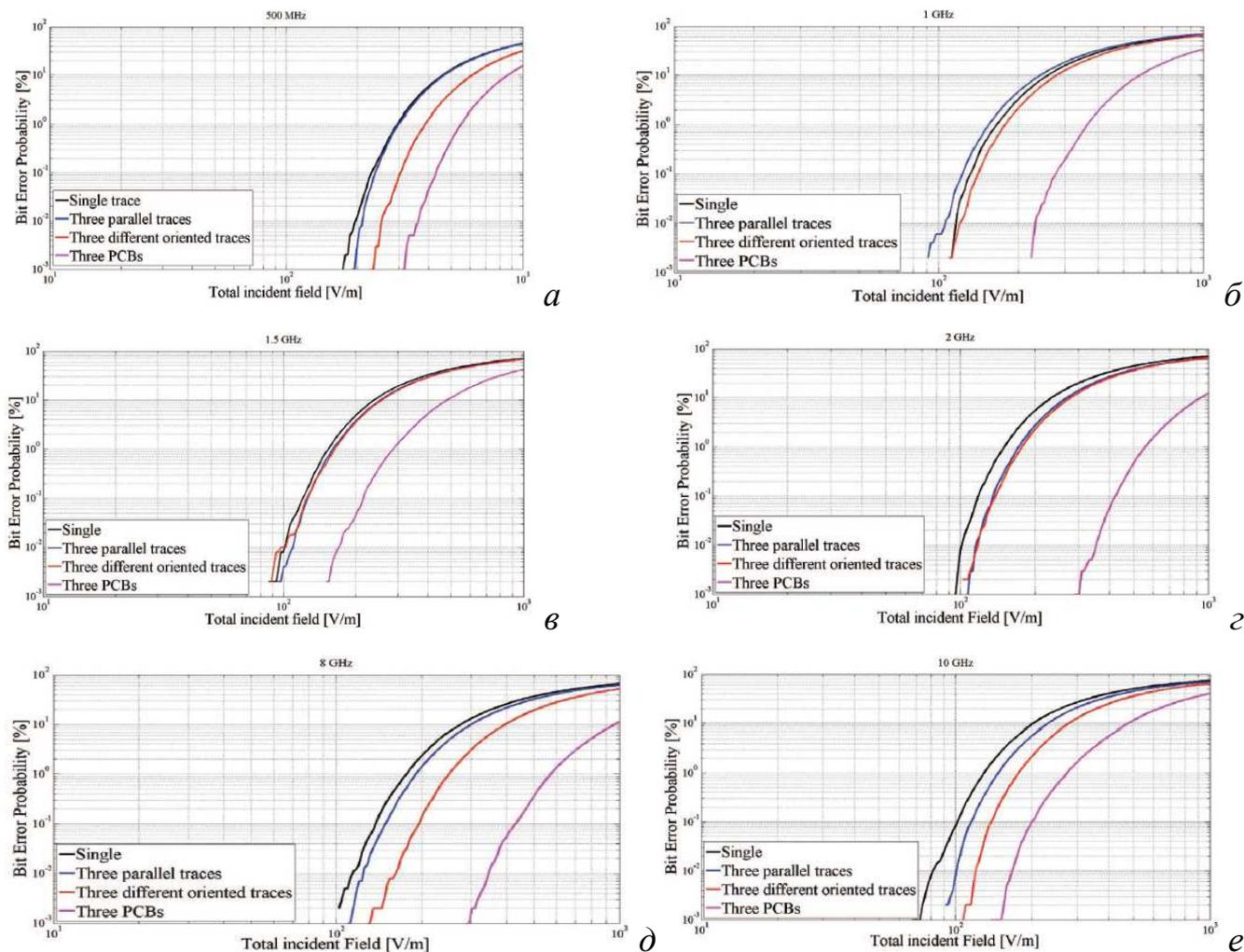


Рисунок 1.5 – Зависимости вероятности битовой ошибки от модуля напряженности воздействующего электрического поля на частотах 0,5 (а), 1 (б), 1,5 (в), 2 (г), 8 (д), 10 (е) ГГц

Отмечена неэффективность системы с резервированием, состоящей из трех параллельных трасс на одной ПП. Так, на частотах до 5 ГГц она имеет такую же вероятность битовой ошибки (рисунок 1.5), как и в системе без резервирования. Однако с повышением частоты до 10 ГГц в резервируемой системе с параллельными трассами вероятность битовой ошибки уменьшается. Эффективность системы с тремя непараллельными трассами ограничена лишь частотами в 0,5 и 5 ГГц. На всех остальных частотах ситуация схожа с нерезервированной системой. Это может быть связано с тем, что две трассы

расположены ближе к краям платы, где они более чувствительны к падающей плоской волне.

Таким образом, в работах отмечено влияние связей между трассами, однако вопросы их практического использования для повышения помехозащищенности не рассматриваются. Стоит отметить, что лишь немного научных работ, посвященных обеспечению ЭМС, затрагивают данную тематику. В частности, коллегами автора выполнены отдельные предварительные исследования по МР, опубликованные без его соавторства в работах [55 – 61].

1.4 Модальная фильтрация

В данном разделе описан принцип защиты от СКИ, на основе разложения сигнала помехи в связанных линиях передачи [62], приведены формулы, связывающие число и параметры отрезков для разложения импульсного сигнала с заданными параметрами и позволяющие выполнить расчёт МФ [63 – 72], продемонстрировано разложение импульса в отрезке связанных линий на 2 импульса вдвое меньшей амплитуды, рассмотрено последовательное разложение импульса в нескольких отрезках.

При распространении импульса в отрезке линии, с неоднородным диэлектрическим заполнением, из N проводников (не считая опорного) импульс может подвергаться модальным искажениям, вплоть до разложения на N импульсов меньшей амплитуды, из-за различия погонных задержек мод в линии [63]. Полное разложение импульса в отрезке длиной l возможно, если общая длительность импульса t_{Σ} меньше минимального модуля разности задержек распространения мод в линии, т.е. при условии

$$t_{\Sigma} < l \cdot \min |\tau_i - \tau_k|, \quad i, k=1, \dots, N, \quad i \neq k, \quad (1.1)$$

где $\tau_{i(k)}$ – погонная задержка $i(k)$ -й моды отрезка. Для пары связанных линий ($N=2$) из (1.1) следует

$$t_{\Sigma} < l |\tau_2 - \tau_1|, \quad (1.2)$$

где τ_2, τ_1 – погонные задержки чётной и нечётной мод в отрезке связанных линий.

Таким образом, если в начало отрезка связанных линий между одним и общим проводниками подается импульс длительностью меньшей, чем разность задержек мод этого отрезка, то к концу отрезка (между теми же проводниками) придут 2 импульса (импульс 1 и импульс 2), причем амплитудой в 2 раза меньшей, чем амплитуда импульса в начале отрезка (рисунок 1.6) (Результаты вычислены при значениях резисторов, выбранных из условия псевдосогласования).

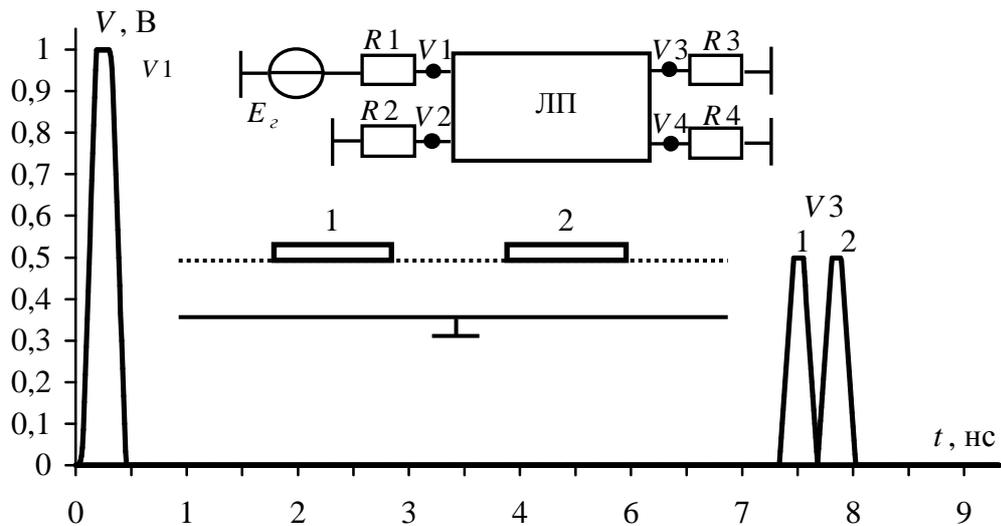


Рисунок 1.6 – Разложение импульса в одиночном отрезке связанной линии

Режим холостого хода на концах пассивного проводника (когда к концам пассивного проводника подключались резисторы с сопротивлением 10 кОм, а на активных проводниках выбирались из условия псевдосогласования) не влияет на форму импульсов разложения, а только незначительно изменяет их амплитуду (рисунок 1.7). Последующие результаты в этом разделе представлены для условия псевдосогласования.

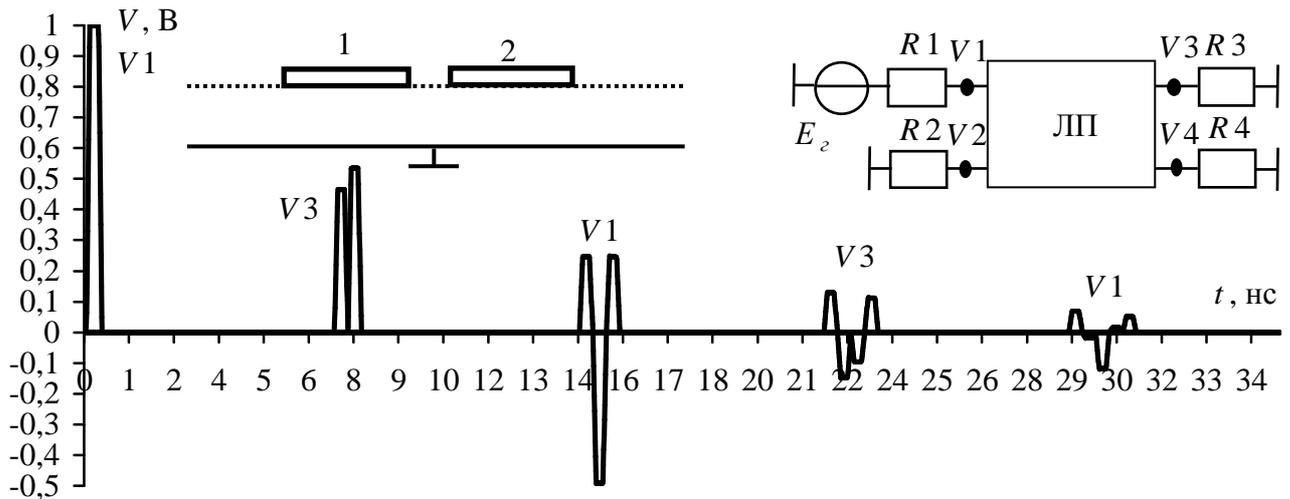


Рисунок 1.7 – Формы напряжения в активном проводнике для режима холостого хода на концах пассивного проводника

Факт уменьшения вдвое амплитуды импульса может быть использован для защиты от коротких импульсов с опасно высоким напряжением в линиях передачи. Причем, можно предположить, что каскадное соединение отрезков приведет к последовательному делению каждого импульса на 2 импульса вдвое меньшей амплитуды. Действительно, подключение к отрезку из рисунка 1.6 ещё одного отрезка приведет к тому, что импульс 1 разложится на импульс 1.1 и импульс 1.2, тогда как импульс 2 разложится на импульс 2.1 и импульс 2.2. Эти импульсы не будут совпадать друг с другом в двух случаях: если разность задержек мод у второго отрезка, как минимум, вдвое больше, чем у первого (тогда получится последовательность импульсов 1.1, 2.1, 1.2, 2.2, см. рисунок 1.8); если разность задержек мод у первого отрезка, как минимум, вдвое больше, чем у второго (тогда получится последовательность импульсов 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, см. рисунок 1.9).

Отметим, что структуры из рисунков 1.8, 1.9 представляют собой, по существу, одну структуру, возбуждаемую импульсом с разных сторон. Так что, несмотря на явную асимметрию, можно говорить о взаимности подобных структур.

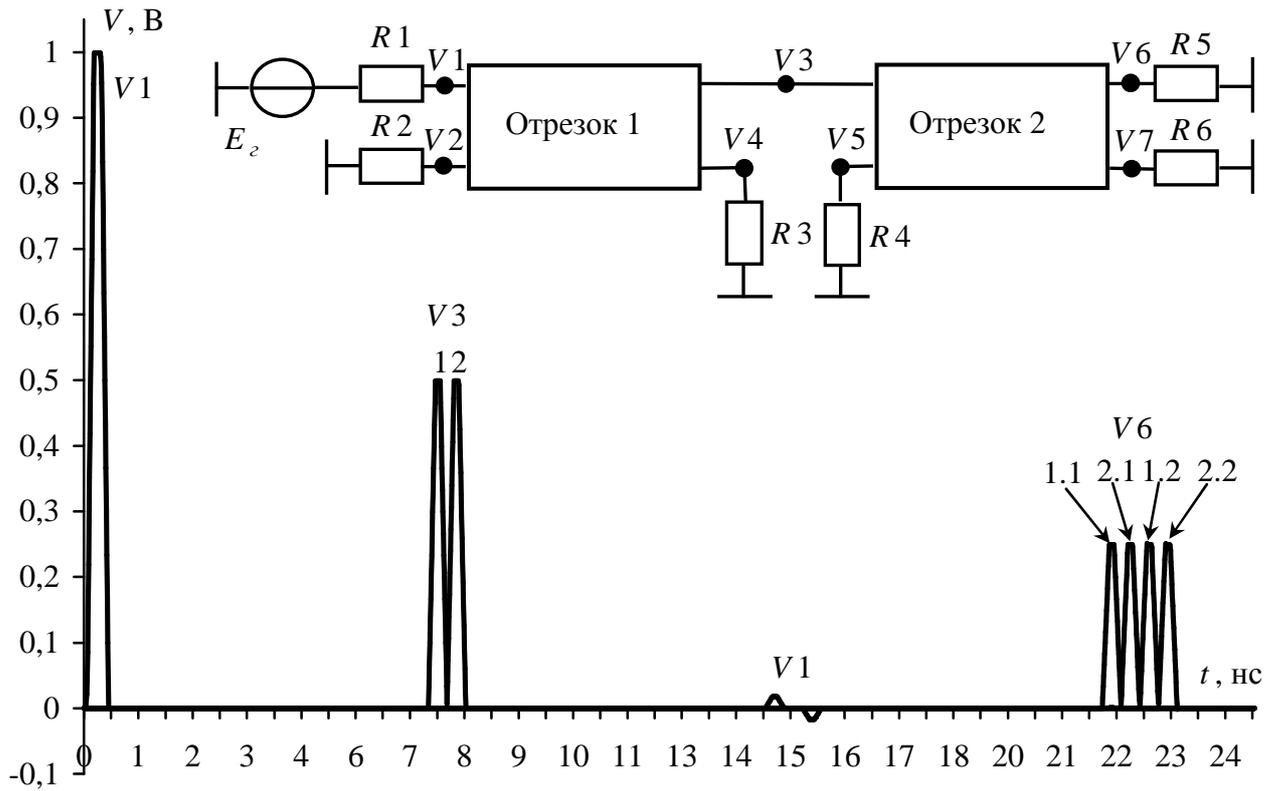


Рисунок 1.8 – Разложение импульса в двух отрезках связанных линий, случай 1 (разность задержек мод у второго отрезка вдвое больше, чем у первого)

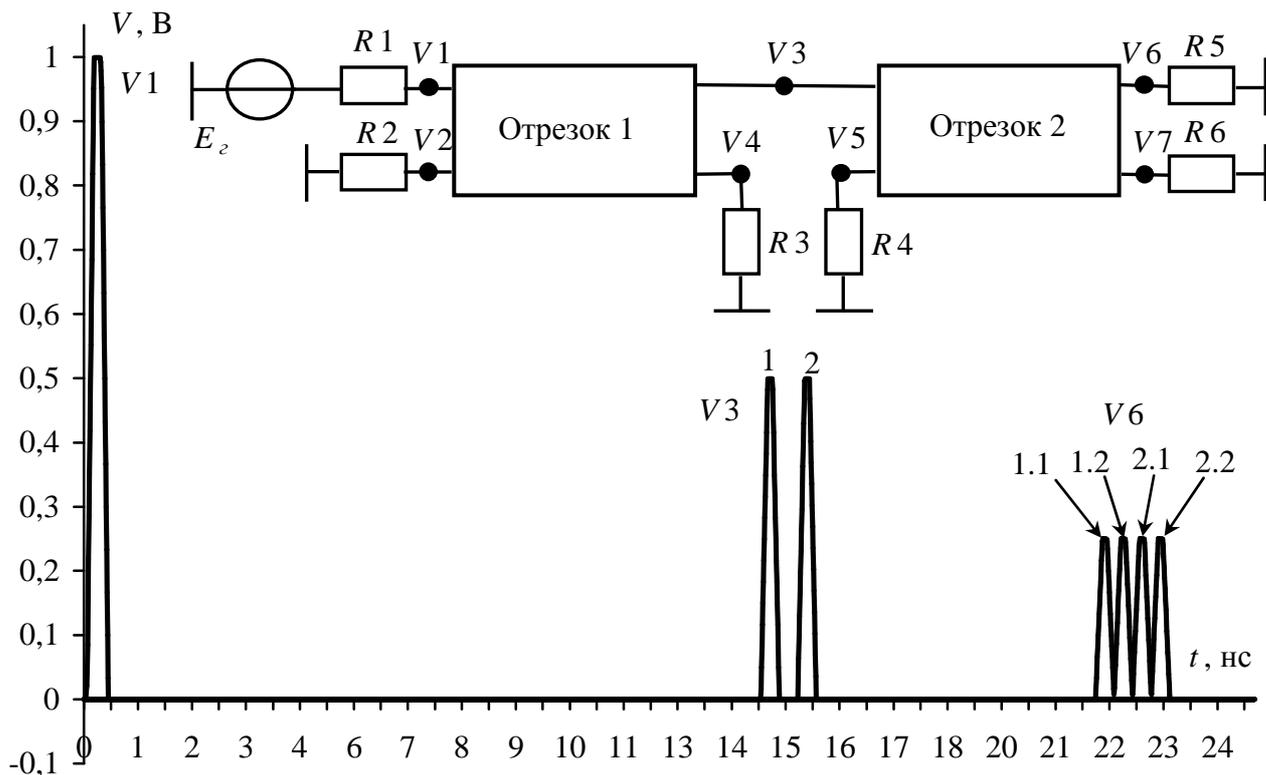


Рисунок 1.9 – Разложение импульса в двух отрезках связанных линий, случай 2 (разность задержек мод у первого отрезка вдвое больше, чем у второго)

Естественно полагать, что последовательное соединение n отрезков приведет при определенных условиях к разложению на 2^n импульсов. Так, 3 отрезка дадут 2^3 , то есть 8 импульсов в 8 раз меньшей амплитуды, например, если перед структурой из рисунка 1.9 включить отрезок с вдвое большей (чем у последующего) разностью задержек мод (рисунок 1.10).

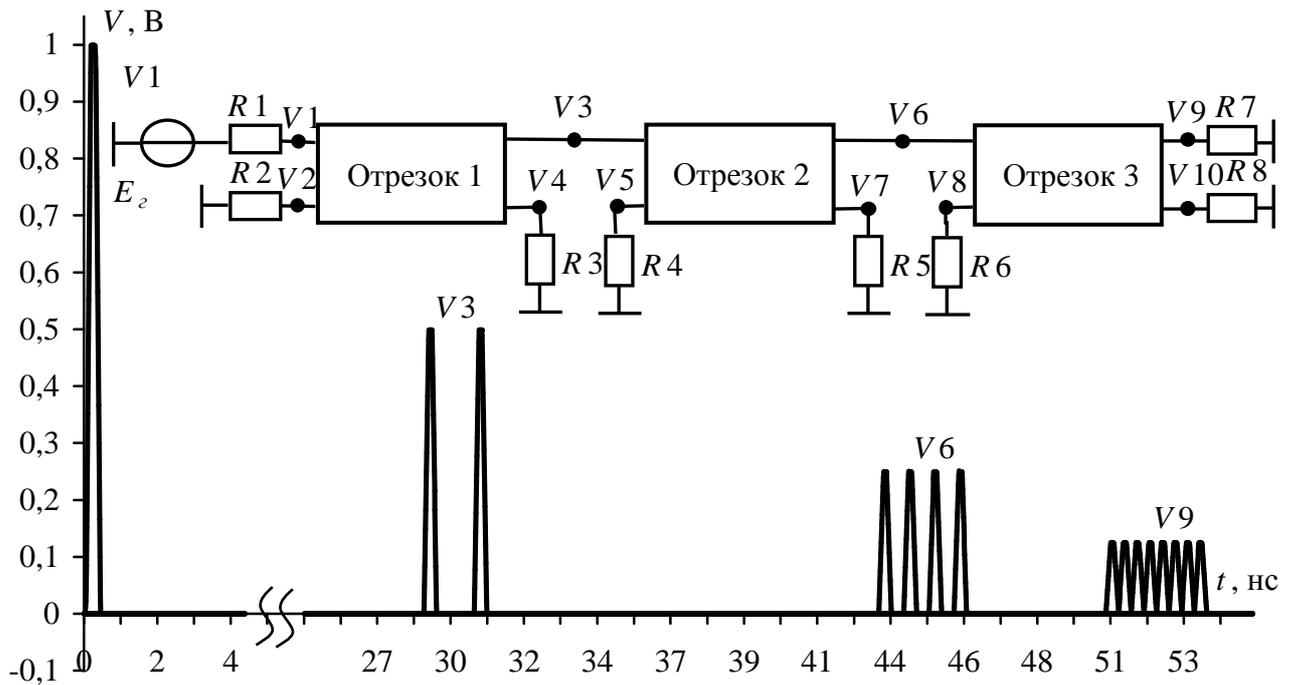


Рисунок 1.10 – Разложение импульса в трёх отрезках связанных линий

Для структуры из n отрезков длина k -го отрезка

$$l_k = l(2^{k-1}), \quad k=1, \dots, n, \quad (1.3)$$

а общая длина структуры

$$L_n = l(2^n - 1). \quad (1.4)$$

Таким образом, простые формулы (1.2) – (1.4) связывают число и параметры отрезков для разложения импульса с заданными параметрами, позволяя выполнить расчёт защиты. Тип линии не имеет принципиального значения; в рассмотренных примерах использовалась микрополосковая линия с параметрами, детально описанными в работах [73, 74]. Для моделирования распространения импульса использовано квазистатическое приближение: вычисление матриц погонных параметров линии выполнено в системах LINPAR и TALGAT с хорошим совпадением результатов. Потери и дисперсия в линиях не учитывались, но их влияние вполне предсказуемо: прежде всего, оно скажется в «размывании» импульсов и приведет к частичному слиянию импульсов на фронтах и спадах, что может быть даже полезным для защиты (один импульс той же амплитуды вместо нескольких).

Практическая реализация нового принципа защиты за счет модального разложения импульса в отрезках связанных линий представляется возможной на разных структурных уровнях аппаратуры, например, с помощью кабелей, в виде отдельных блоков, а также компонентов, в том числе печатных.

Исследовалась возможность реализации модальной фильтрации в межсоединениях помехозащищенной теплопроводной монтажной платы (ПТМП) [75]. Показано, что модуль разности погонных задержек мод $|\Delta\tau|$ для разных линий и параметров меняется от 0 до 1,5 нс/м (таблица 1.1). Таким образом, разность погонных задержек мод в межсоединениях ПТМП может привести к модальным явлениям, что позволяет использовать линии передачи ПТМП длиной в десятки сантиметров для модальной фильтрации импульсов длительностью в сотни пикосекунд. Сделанный вывод может оставаться справедливым для межсоединений и других ПП [76]. Так, в многослойных ПП (МПП) разность погонных задержек мод для внутренних слоёв близка к нулю из-за однородного диэлектрического заполнения полосковых линий. Однако для внешнего слоя, состоящего из микрополосковых линий с покрывающим слоем диэлектрика или без него, эта разность может быть значительной. Например, оценка для 50-омной микрополосковой линии МПП с реальными параметрами даёт 0,6 нс/м. Следовательно в ПП могут существовать скрытые и неиспользуемые ресурсы модального разложения [77].

Таблица 1.1 – Погонные задержки мод и их разность для двухпроводных межсоединений ПТМП

Слои СТП	$s+w$, мм		ОПЛ			ППЛ			ОПЛ и ППЛ		
			τ_1	τ_2	$\Delta\tau$	τ_1	τ_2	$\Delta\tau$	τ_1	τ_2	$\Delta\tau$
4	0	без лака							7,698	6,270	1,428
		с лаком							7,758	7,199	0,559
	0,625	без лака	7,530	7,530	0	6,456	5,432	1,024	7,513	6,061	1,452
		с лаком	7,704	7,634	0,070	7,194	7,163	0,031	7,675	7,168	0,507
	1,25	без лака	7,564	7,468	0,096	6,353	5,780	0,573	7,524	6,086	1,438
		с лаком	7,657	7,651	0,006	7,210	7,102	0,108	7,657	7,158	0,499
	2,5	без лака	7,570	7,519	0,051	6,177	5,974	0,203	7,524	6,101	1,423
		с лаком	7,680	7,657	0,023	7,231	7,092	0,139	7,657	7,158	0,499
6	0	без лака							7,651	6,184	1,467
		с лаком							7,752	7,087	0,665
	0,625	без лака	7,435	7,353	0,082	6,394	5,473	0,921	7,353	6,053	1,300
		с лаком	7,675	7,508	0,167	7,194	7,077	0,117	7,616	7,107	0,509
	1,25	без лака	7,418	7,289	0,129	6,345	5,750	0,595	7,364	6,057	1,307
		с лаком	7,587	7,541	0,046	7,138	7,077	0,061	7,564	7,107	0,457
	2,5	без лака	7,413	7,315	0,098	6,188	5,935	0,253	7,369	6,075	1,294
		с лаком	7,582	7,547	0,035	7,184	7,037	0,147	7,564	7,107	0,457
8	0	без лака							7,605	6,143	1,462
		с лаком							7,746	6,993	0,753
	0,625	без лака	7,364	7,231	0,133	6,337	5,435	0,902	7,241	6,006	1,235
		с лаком	7,645	7,402	0,243	7,168	6,988	0,180	7,564	7,032	0,532
	1,25	без лака	7,310	7,174	0,136	6,321	5,701	0,620	7,252	6,006	1,246
		с лаком	7,530	7,446	0,084	7,057	7,027	0,030	7,491	7,032	0,459
	2,5	без лака	7,321	7,184	0,137	6,177	5,875	0,302	7,267	6,035	1,232
		с лаком	7,508	7,463	0,045	7,123	6,964	0,159	7,491	7,032	0,459

Примечание: СТП – стеклоткань прокладочная; s – расстояние между трассами; w – ширина трассы; ОПЛ – обращенная полосковая линия; ППЛ – подвешенная полосковая линия

1.5 Цель и задачи исследования

Работа многих технических систем основана на РЭА. Недостаточное внимание к повышению надежности и обеспечению ЭМС РЭА, как правило, недопустимо, особенно в транспортной, атомной, военной и космической

отраслях. Из них показательна последняя, поскольку необходимо повышение срока активного существования необслуживаемых космических аппаратов (КА) до 15–20 лет.

Для повышения надежности можно использовать резервирование, но резервные устройства кратно увеличивают массу, размеры и стоимость РЭА, что часто неприемлемо. При этом все более обостряющаяся проблема ЭМС требует принятия дополнительных мер, ещё более ухудшающих указанные характеристики. Поэтому, необходимо использовать новые способы повышения надежности и обеспечения ЭМС РЭА.

Между тем, есть возможности совместного повышения надежности и обеспечения ЭМС. Известно, что резервирование вносит в систему избыточность, не используемую во время штатной работы резервируемой цепи. Наличие этой избыточности, присущей РЭА с резервированием, создает скрытый ресурс, одним из возможных применений которого является обеспечение ЭМС. Исследования электромагнитных связей, возникающих между электрическими соединениями резервных и резервируемых модулей, могут позволить сформулировать основы проектирования радиоэлектронных средств, отличающихся повышенной помехозащищенностью. Реализация указанных системных эффектов является комплексной исследовательской задачей.

Из обзора в разделе 1 следует, что задачи повышения надежности и обеспечения ЭМС РЭА актуальны. Рассмотрены резервирование, способы повышения помехоустойчивости и модальная фильтрация. Между тем, в приведенных обзорах и исследованиях не рассматривается возможность использования модального разложения сигнала в отрезках связанных линий при резервировании электрических соединений, но оно может быть применимо для этого. Таким образом, разработка устройств с применением МР является перспективным направлением исследований.

Цель работы – повысить надежность и помехозащищенность РЭА. Для ее достижения надо предложить новые способы резервирования и показать их реализуемость.

2 Способы модального резервирования

2.1 Суть способов

Широко известны способы резервирования плоских кабелей и ПП, когда резервируемый и резервный плоские кабели расположены произвольно по отношению друг к другу [5], резервируемая схема размещена на одном участке ПП, а резервирующая на соседнем, резервируемая схема размещается на одной ПП (резервируемой), а резервирующая – на другой (резервной), причем ПП располагаются произвольно относительно друг друга [78]. Недостатком этих способов является отсутствие полезных взаимных влияний, в частности за счет электромагнитных связей между резервируемым и резервным проводниками резервной и резервируемой цепей во время работы одной из них. Используя модальную фильтрацию [62] и комбинируя способы трассировки и компоновки, можно усилить защиту резервируемых и резервных цепей от СКИ, а также рационализировать использование площадей ПП.

Применяя описанные ниже способы, оригинальность которых подтверждается получением на них патентов на изобретения [79 – 84], можно добиться уменьшения восприимчивости рассматриваемых цепей к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшения уровня кондуктивных эмиссий от этих цепей. В случае выхода из строя резервируемой цепи, в резервной цепи будет достигаться аналогичный результат. Он достигается за счет того, что помеховый импульс, длительность которого меньше абсолютного значения разности задержек четной и нечетной мод в структуре связанной линии, образованной парой проводников резервируемой и резервной цепей, подвергается модальным искажениям, проявляющимся в разложении на импульсы меньшей амплитуды (при рассмотрении сигнала во временной области). При гармонической же помехе её амплитуда на определенных частотах минимизируется за счет того, что её четная и нечетная моды оказываются в противофазе. Естественно, что на этих

частотах можно ожидать уменьшения не только кондуктивных, но и излучаемых эмиссий, равно как и уменьшения восприимчивости, не только к кондуктивным, но и излучаемым воздействиям. В случае трехкратного резервирования [85, 86], когда добавлены две дополнительные резервные цепи, воздействующий сигнал может разлагаться не на две моды (четную и нечетную), а четыре. При воздействии импульса амплитуды импульсов разложения могут быть меньше.

Для доказательства реализуемости этих способов далее представлены результаты моделирования (без учета потерь) конкретных структур длиной 1 м, в котором импульсная помеха (в форме трапеции с ЭДС 2 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс) подавалась между резервируемой трассой (активным проводником) и опорным проводником, а функцию резервной трассы выполнял пассивный проводник. В них наблюдается обусловленное разностью задержек мод в структуре разложение импульсной помехи на импульсы меньшей амплитуды, позволяющее уменьшить восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям. В случае подачи импульсной помехи между пассивным и опорным проводниками, на дальнем конце активного проводника наблюдается аналогичный временной отклик. При гармоническом воздействии с ЭДС 2 В на частотной зависимости выходного напряжения наблюдается ослабление исходного сигнала, вплоть до нуля, на определенных частотах, позволяющее значительно ослабить помеховые сигналы в определенном частотном диапазоне.

2.2 Однократное резервирование

В данном разделе представлены способы однократного МР по материалам патентов на изобретения [79 – 84].

2.2.1 Способ трассировки печатных проводников

Предложен способ [79] трассировки печатных проводников цепей с резервированием (рисунок 2.1). Он включает трассировку резервируемых и резервных проводников с опорным проводником в виде отдельного слоя. При этом резервируемая и резервная цепи имеют один опорный проводник, а резервируемые и резервные проводники одноименных цепей прокладываются парами, параллельно друг другу, на одном слое, с минимально допустимым зазором между ними. Геометрические параметры проводников структуры: $d=w=300$ мкм, $s=100$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h=510$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=10$.

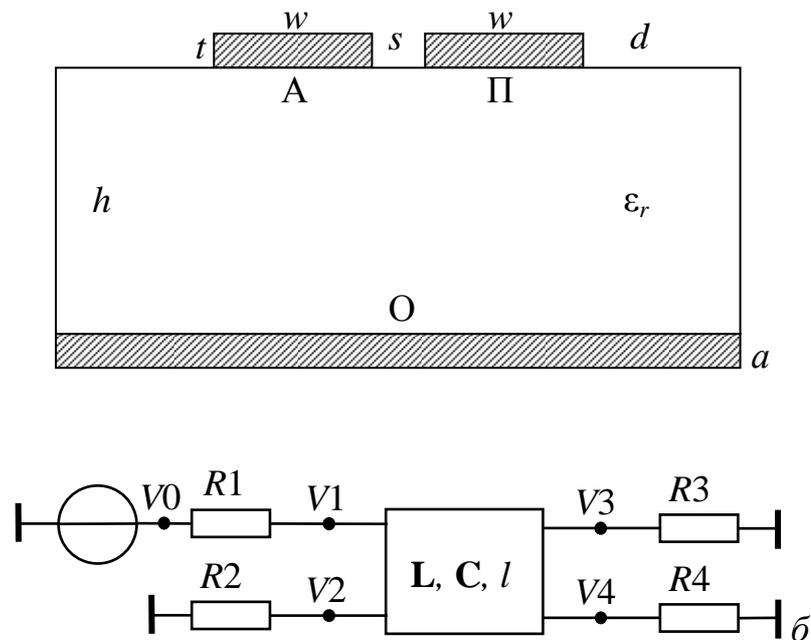


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение структуры связанных линий, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а).

Принципиальная схема (б)

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V3$ на рисунке 2.1б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,5 В (рисунок 2.2), что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Номинал

резисторов R здесь и далее, если не указано иначе, выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. Сравнение частотных откликов предложенной структуры связанных линий и одиночной микрополосковой линии (МПЛ) показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рисунок 2.3).

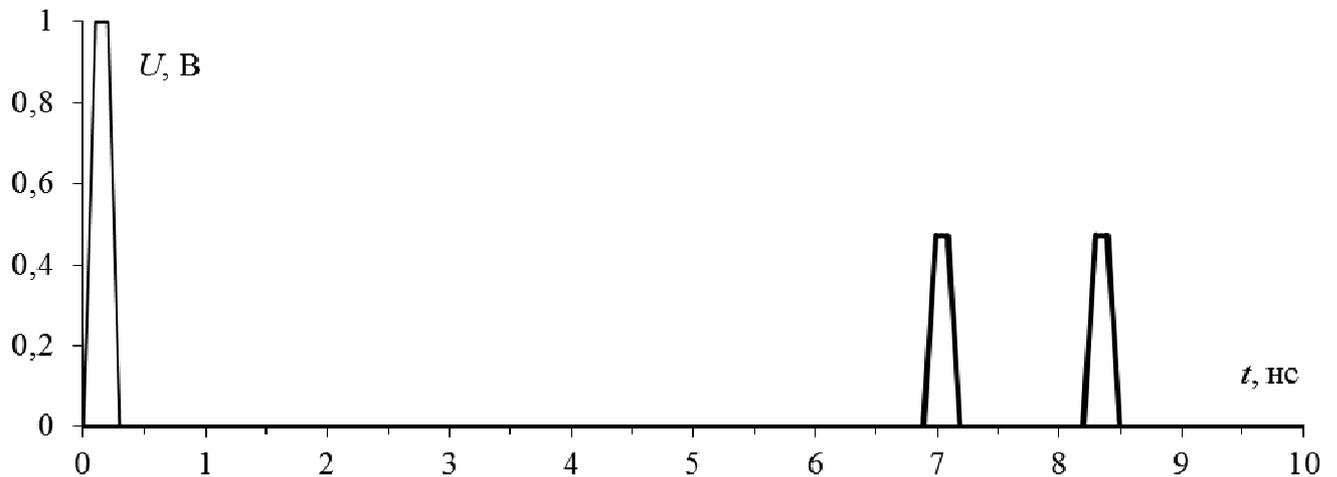


Рисунок 2.2 – Формы напряжения в начале (—) и конце (---) активного проводника структуры

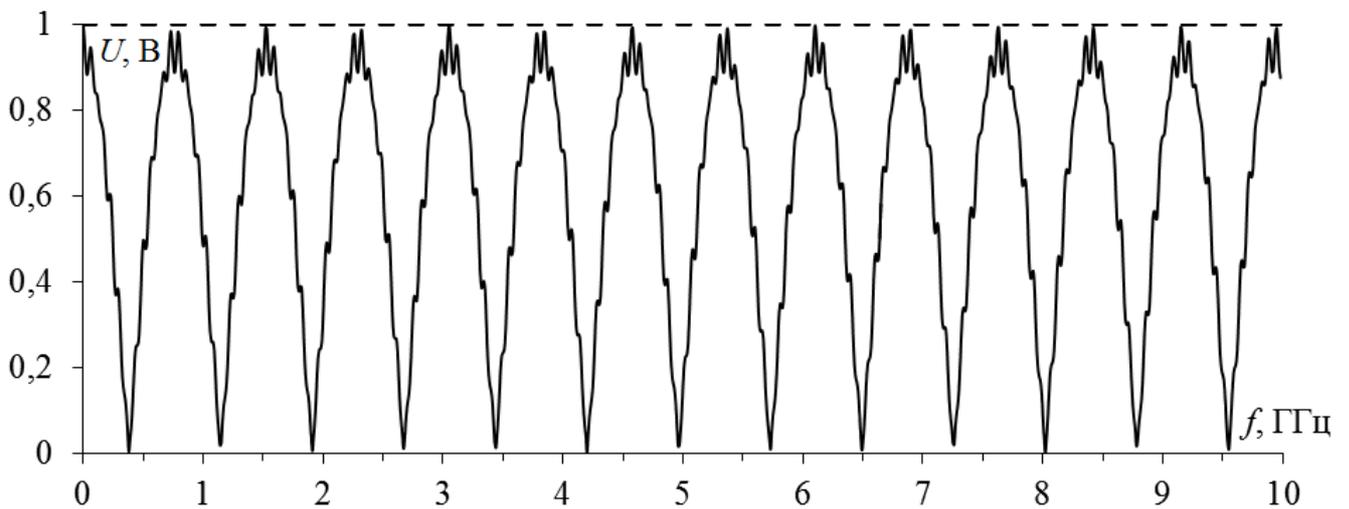


Рисунок 2.3 – Частотные отклики на гармоническое воздействие связанной линии (—) и одиночной МПЛ (---)

2.2.2 Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком

Предложен другой способ [80] трассировки печатных проводников для цепей с резервированием (рисунок 2.4). Он отличается от предыдущего тем, что зазор между резервируемым и резервным проводниками заполнен диэлектрическим материалом и его относительная диэлектрическая проницаемость больше, чем у материала подложки печатной платы. Геометрические параметры проводников структуры: $d=w=300$ мкм, $s=100$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h=510$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_{r1}=4,2$.

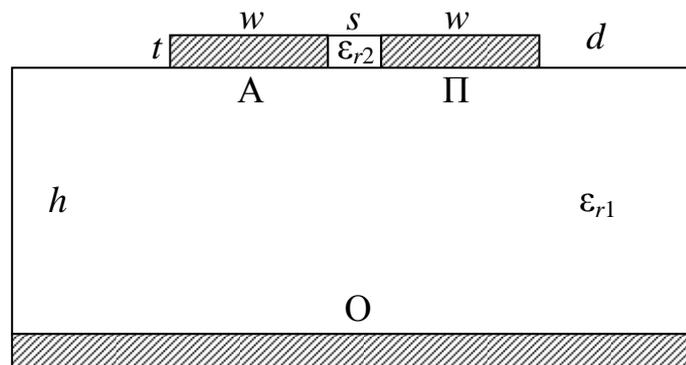


Рисунок 2.4 – Поперечное сечение структуры связанных линий, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы V1 и V3 на рисунке 2.1б) при $\epsilon_{r2}=29$ показывают 2 импульса разложения с амплитудами менее 0,5 В (рисунок 2.5), что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Сравнение частотных откликов для предложенной структуры связанных линий и одиночной МПЛ показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рисунок 2.6).

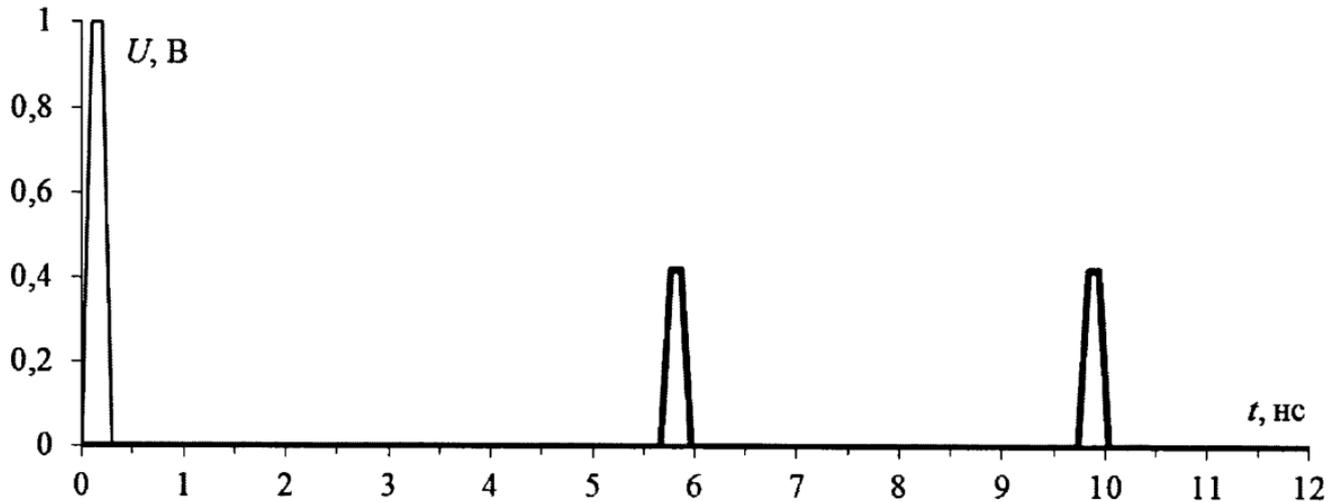


Рисунок 2.5 – Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

Изменение значения относительной диэлектрической проницаемости заполнения зазора между трассами (рисунок 2.7) влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод структуры ($\Delta\tau$), позволяя увеличить её абсолютное значение ($\Delta\tau = -0,8$ нс/м при $\epsilon_{r2}=1$; $\Delta\tau = 4$ нс/м при $\epsilon_{r2}=29$). Это позволяет управлять значениями длительности импульса и частоты гармонического воздействия, для которых возможно модальное разложение.

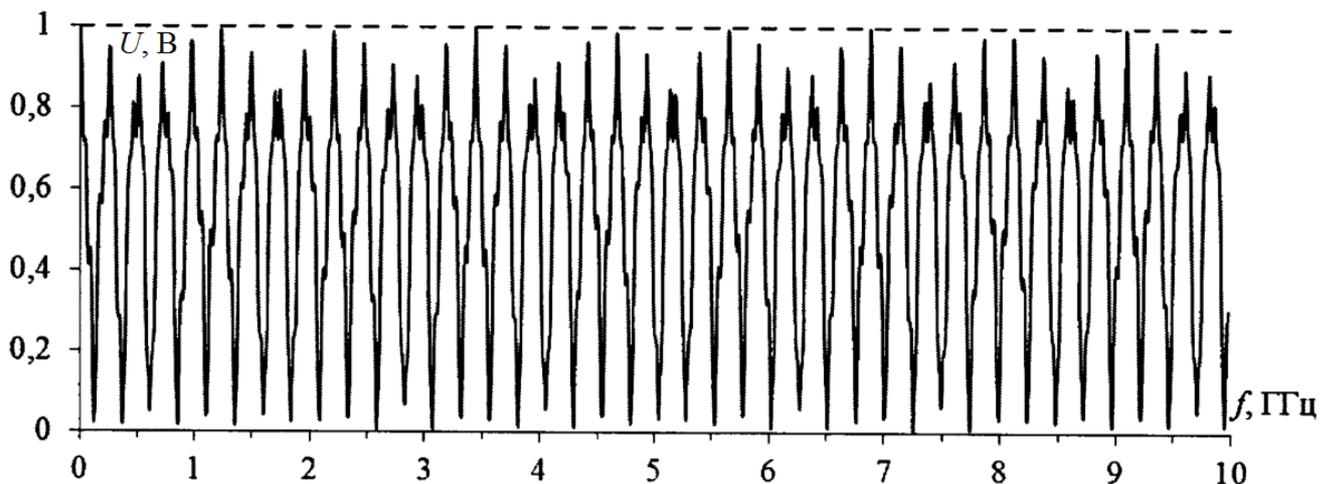
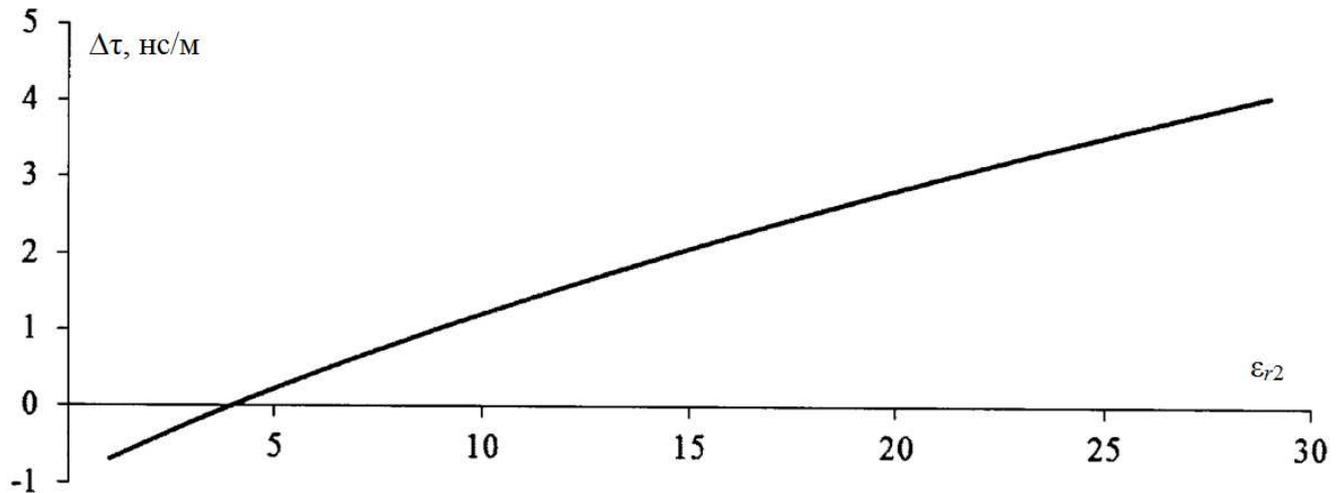


Рисунок 2.6 – Частотные отклики на гармоническое воздействие связанной линии (—) и одиночной МПЛ (— —)

Рисунок 2.7 – Зависимость $\Delta\tau$ от ϵ_{r2}

2.2.3 Способ резервирования для печатных плат

Предложен способ [81] резервирования для ПП (рисунок 2.8). Здесь компоновка и трассировка резервируемой цепи выполняются на верхнем слое подложки, сигнальные проводники выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине, а компоновка и трассировка резервной цепи выполняются на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою. При этом резервируемые и резервные сигнальные проводники одноименных цепей располагаются друг под другом, а оставшиеся проводники электрически соединяются между собой. Геометрические параметры проводников структуры: $w=300$ мкм, $w_1=600$ мкм, $s=60$ мкм, $t=105$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h=290$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=5$. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод эквивалентной двухпроводной линии.

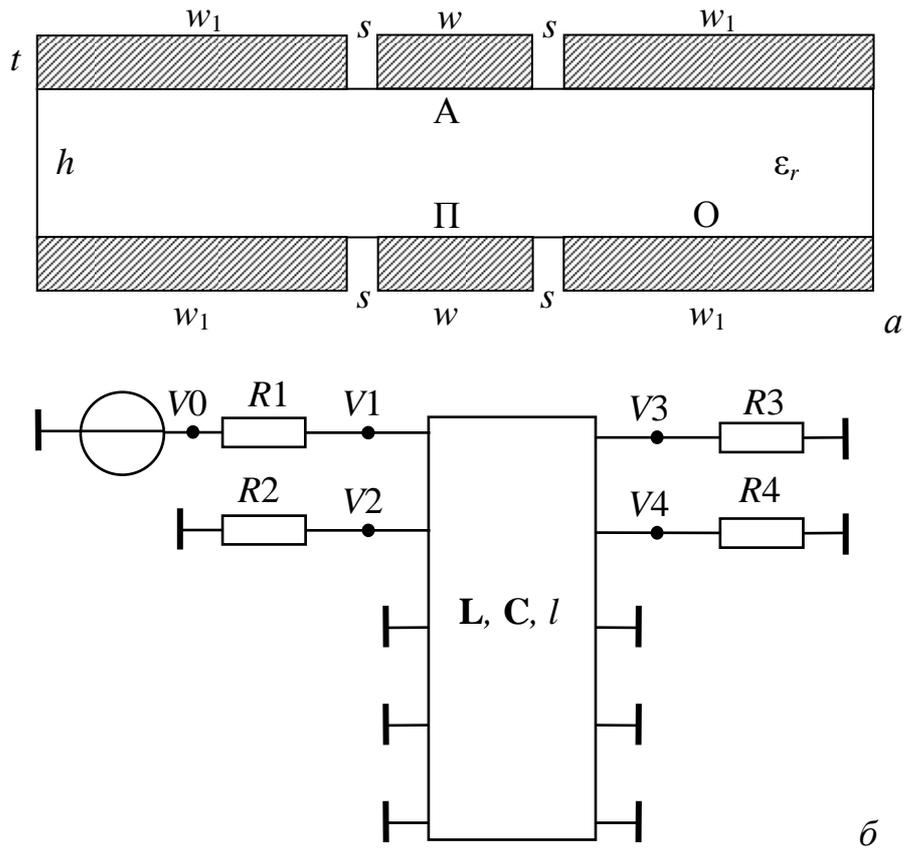


Рисунок 2.8 – Поперечное сечение линии, где проводники:

А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V3$ на рисунке 2.8б) показывают импульсы разложения с амплитудами 0,5 и 0,4 В, что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи в начале линии (0,8 В) или половины ЭДС (1 В) (рисунок 2.9).

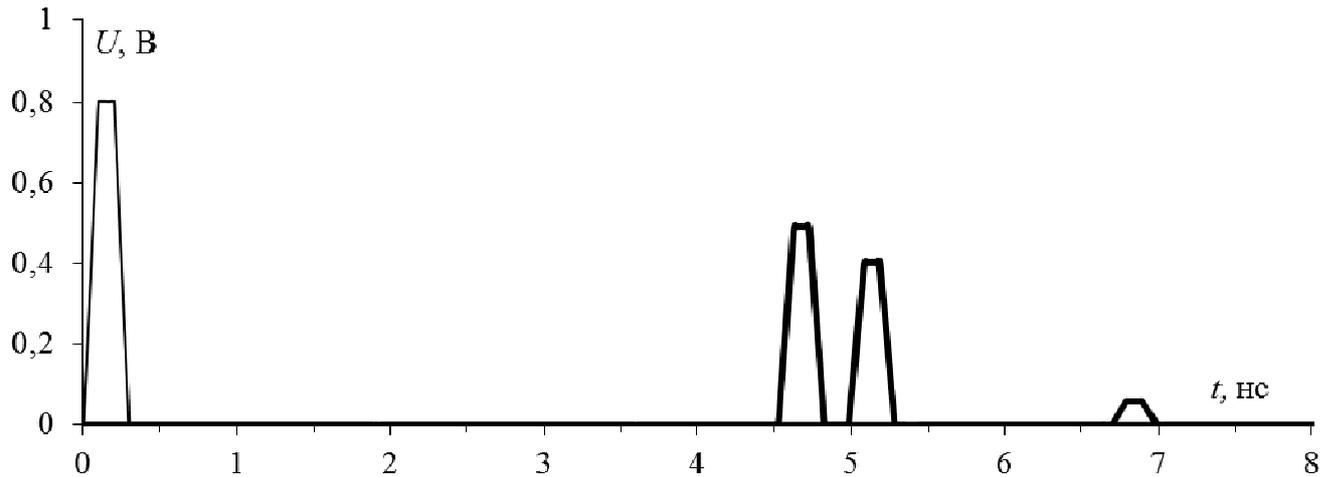


Рисунок 2.9 – Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника линии

Результаты моделирования частотного отклика показывают возможности ослабления помеховых сигналов на определенных частотах (рисунок 2.10).

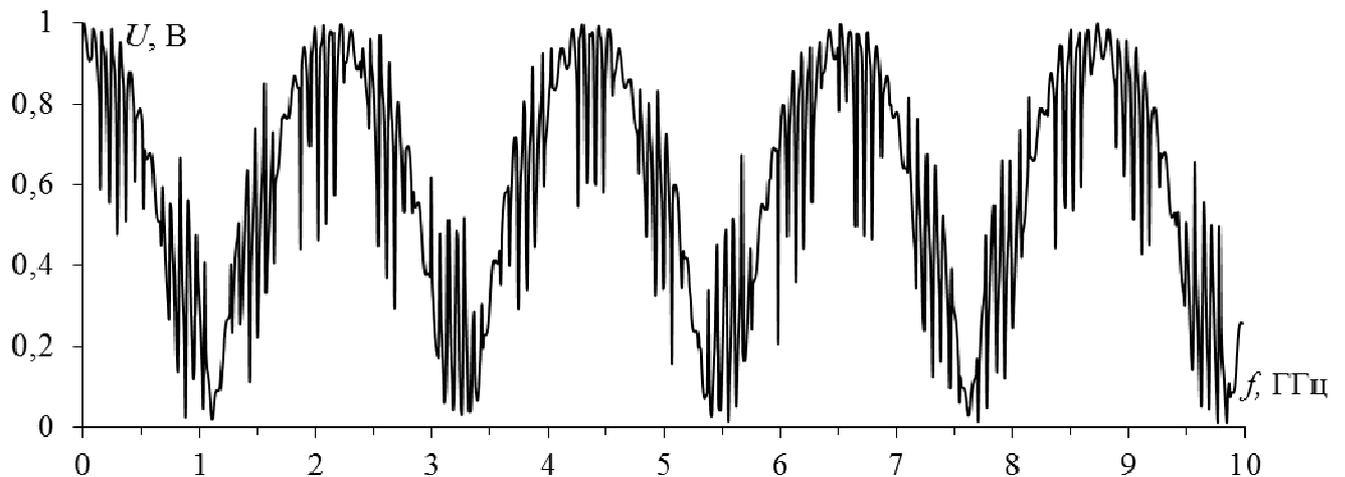


Рисунок 2.10 – Частотный отклик на гармоническое воздействие амплитудой 2 В

2.2.4 Способ компоновки печатных плат

Предложен способ [82] компоновки ПП (рисунок 2.11), включающий взаимное расположение, компоновку и трассировку резервируемой и резервной плат. Он отличается тем, что опорный проводник выполнен в виде отдельных слоев на резервируемой и резервной платах, которые склеиваются слоем диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у

диэлектрических подложек резервируемой и резервной плат. При этом соответствующие друг другу трассы резервируемой и резервной цепей расположены параллельно и друг под другом в склеивающем слое диэлектрика, а резервируемые и резервные радиоэлектронные компоненты размещаются на противоположных склеиваемых сторонах плат. Геометрические параметры проводников структуры: $w=300$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина слоя диэлектрика $h=510$ мкм, толщина подложки $h_1=200$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика $\epsilon_{r2}=29$, а подложки плат $\epsilon_{r1}=5$. Разность значений относительной диэлектрической проницаемости подложек плат и слоя диэлектрика влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод ($\Delta\tau$), которая для данной структуры составляет 6,5 нс/м (рисунок 2.12). Номинал всех резисторов выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод эквивалентной связанной линии.

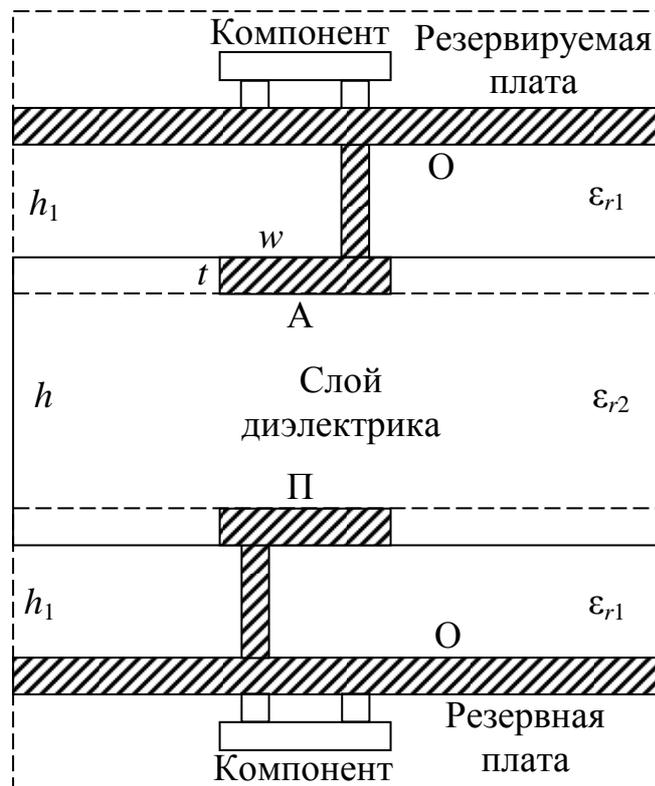


Рисунок 2.11 – Поперечное сечение структуры, реализующей способ, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

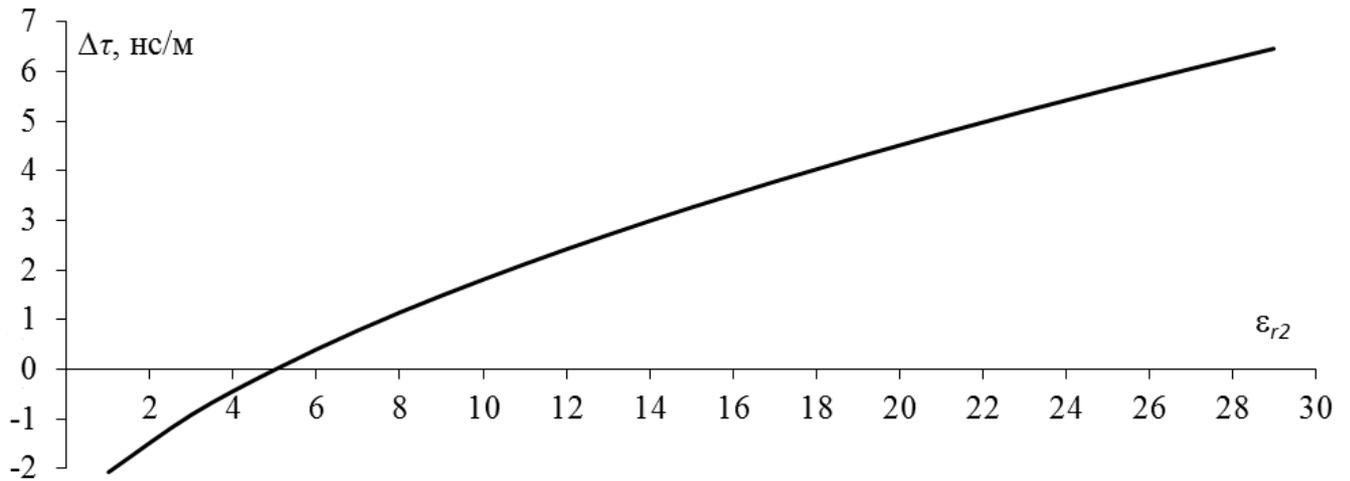


Рисунок 2.12 – Зависимость $\Delta\tau$ от ϵ_{r2}

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы V1 и V3 на рисунке 2.1б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,4 В (рисунок 2.13), что в 2,5 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии.

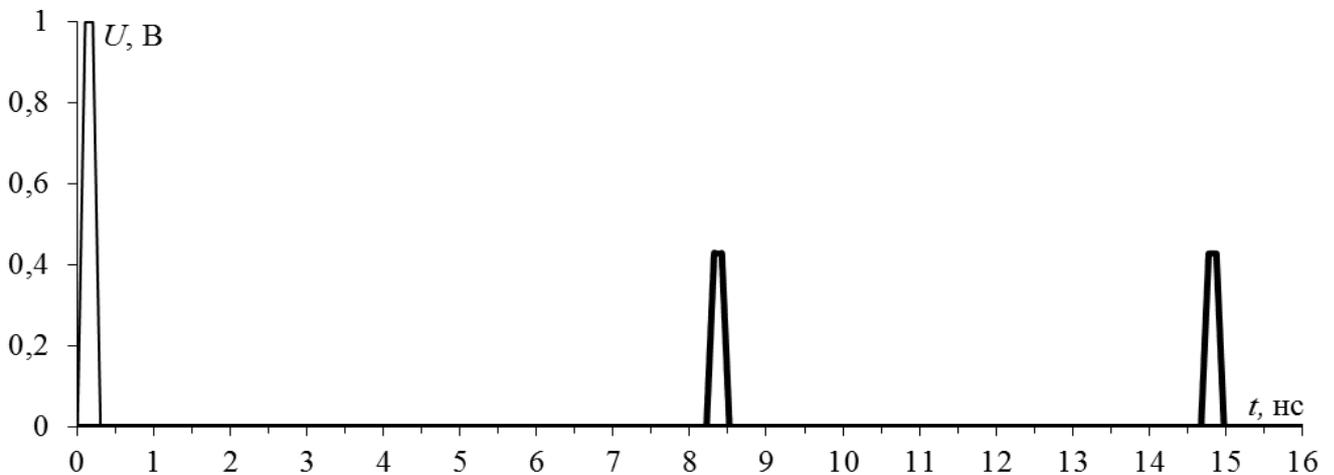


Рисунок 2.13 – Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

Сравнение частотных откликов предложенной структуры и одиночной МПЛ показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рисунок 2.14).

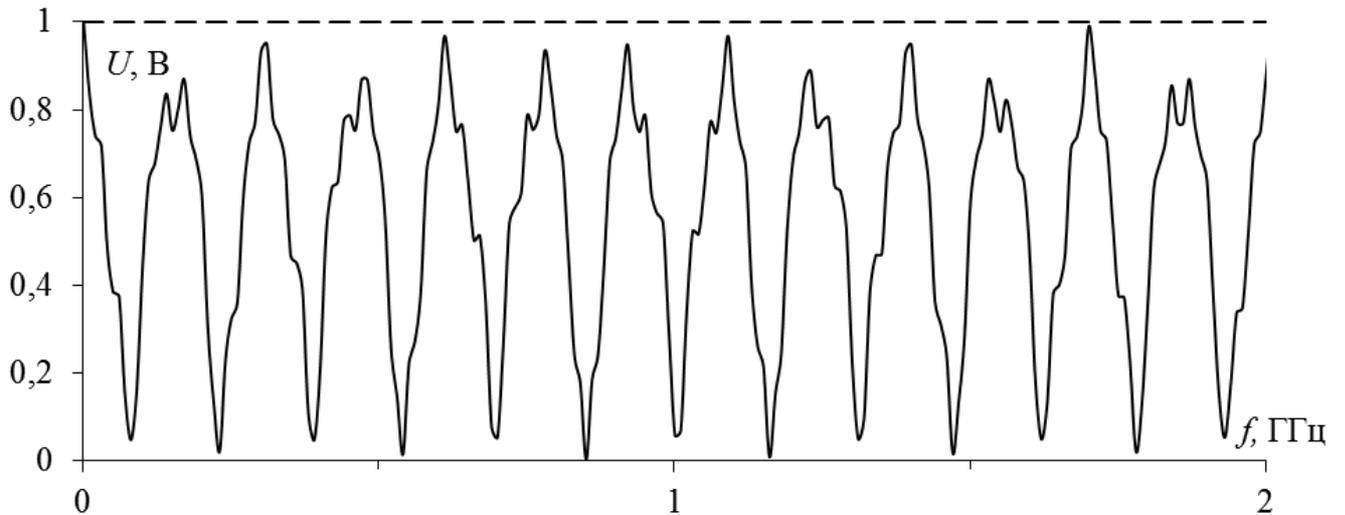


Рисунок 2.14 – Частотные отклики на гармоническое воздействие
одиночной линии (—) и рассматриваемой структуры (—)

2.2.5 Способ внутренней компоновки печатных плат

Предложен другой способ [83] компоновки ПП (рисунок 2.15). Он отличается от предыдущего тем, что резервируемые и резервные компоненты размещаются не на внешних, а на внутренних сторонах резервируемой и резервной ПП в слое склеивающего диэлектрика. Геометрические параметры проводников структуры: $w=300$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина слоя склеивающего диэлектрика $h=510$ мкм, расстояние от подложки до полигона земли $h_1=500$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя склеивающего диэлектрика $\epsilon_{r2}=10$, а подложки плат – $\epsilon_{r1}=5$.

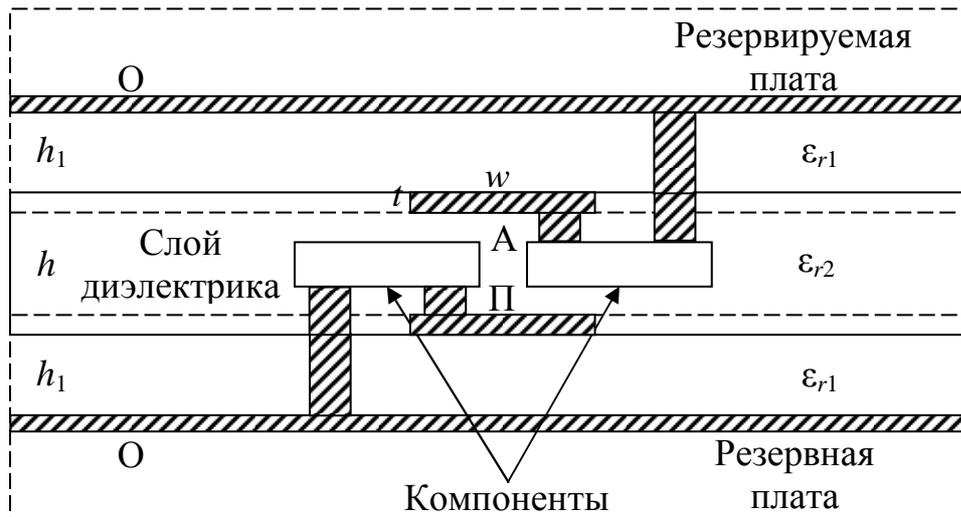


Рисунок 2.15 – Поперечное сечение структуры, реализующей способ внутренней компоновки, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

Разность значений относительной диэлектрической проницаемости подложек плат и слоя диэлектрика между ними влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод структуры ($\Delta\tau$), которая для данной структуры составляет 2 нс/м (рисунок 2.16).

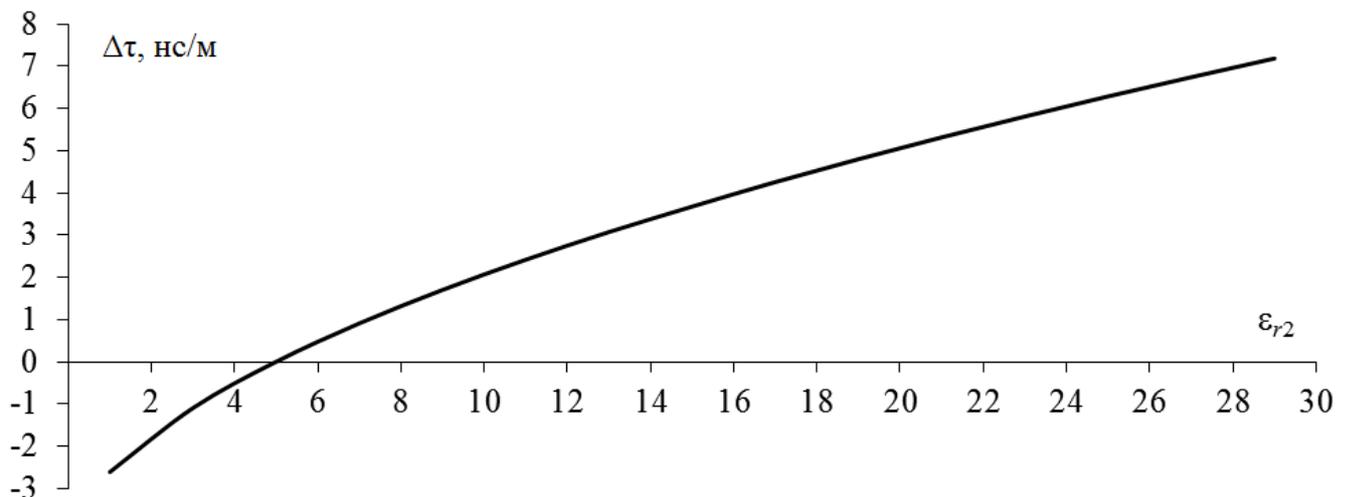


Рисунок 2.16 – Зависимость $\Delta\tau$ от ϵ_{r2}

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы V1 и V3 на рисунке 2.1б)

показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,44 В (рисунок 2.17), что в 2,25 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии.

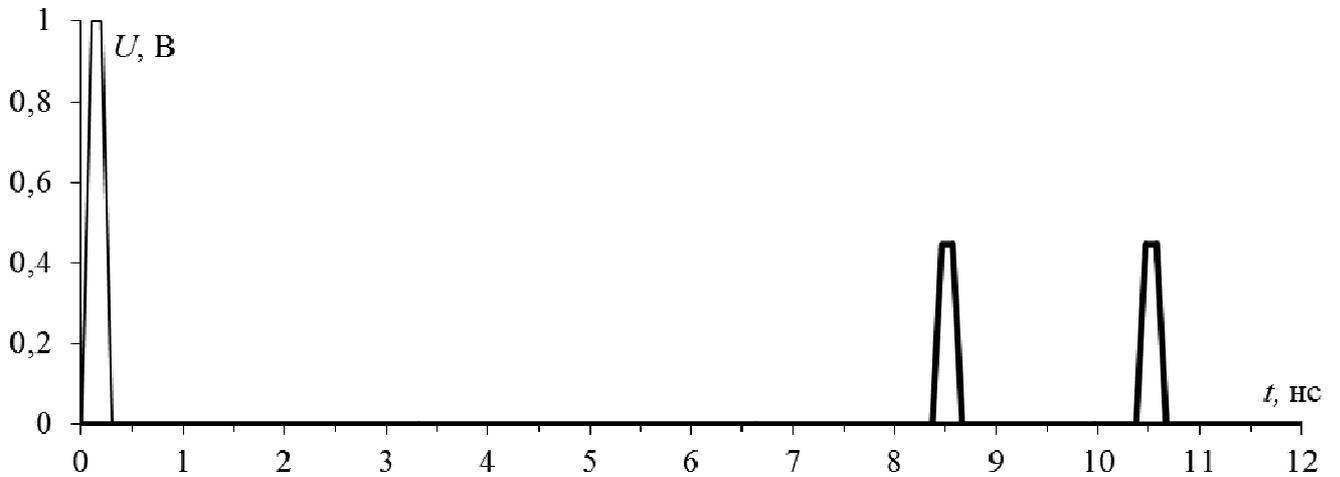


Рисунок 2.17 – Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

Сравнение частотных откликов предложенной структуры и одиночной МПЛ показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рисунок 2.18).

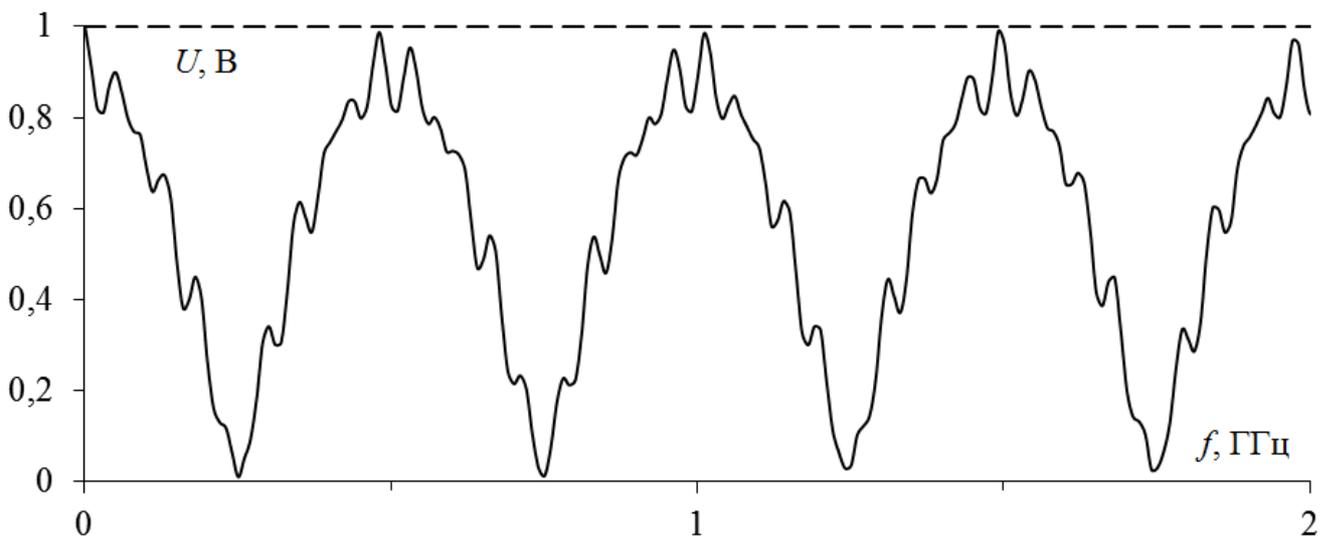


Рисунок 2.18 – Частотные отклики на гармоническое воздействие одиночной линии (—) и рассматриваемой структуры (—)

2.2.6 Способ резервирования плоских кабелей

Предложен способ [84] резервирования плоских кабелей (рисунок 2.19). Он отличается тем, что проводники резервируемого кабеля располагаются на одном уровне, а резервного – на другом. При этом одноименные проводники этих кабелей располагаются друг под другом в диэлектрическом слое. Геометрические параметры проводников структуры: $d=500$ мкм, $w=65$ мкм, $s=60$ мкм, $t=5$ мкм. Толщина структуры $H=25$ мкм, толщина слоя между проводниками $h=5$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя $\epsilon_r=4$. Номинал резисторов $R3$ и $R6$, $R7$ и $R8$ выбран равным 50 Ом; $R1$, $R2$, $R4$ и $R5$ – 1000 Ом (холостой ход). Резисторы $R3$ и $R6$, $R7$ и $R8$ представляют собой нагрузку резервируемой и резервной цепей соответственно. Резисторы $R1$, $R2$, $R4$, $R5$ введены в схему для учета гальванической связи резервного кабеля с землей резервируемой цепи.

Импульсная помеха подавалась между активным и опорным проводниками резервируемой цепи, функцию резервного плоского кабеля выполняют пассивные проводники. Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V3$ и $V6$ на рисунке 2.19б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,22 и 0,32 В (рисунок 2.20), что в 3 – 5 раз меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии.

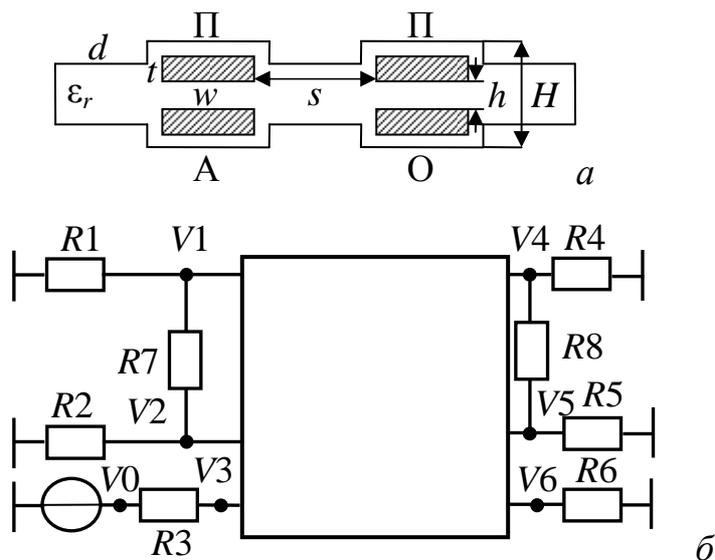


Рисунок 2.19 – Поперечное сечение структуры, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

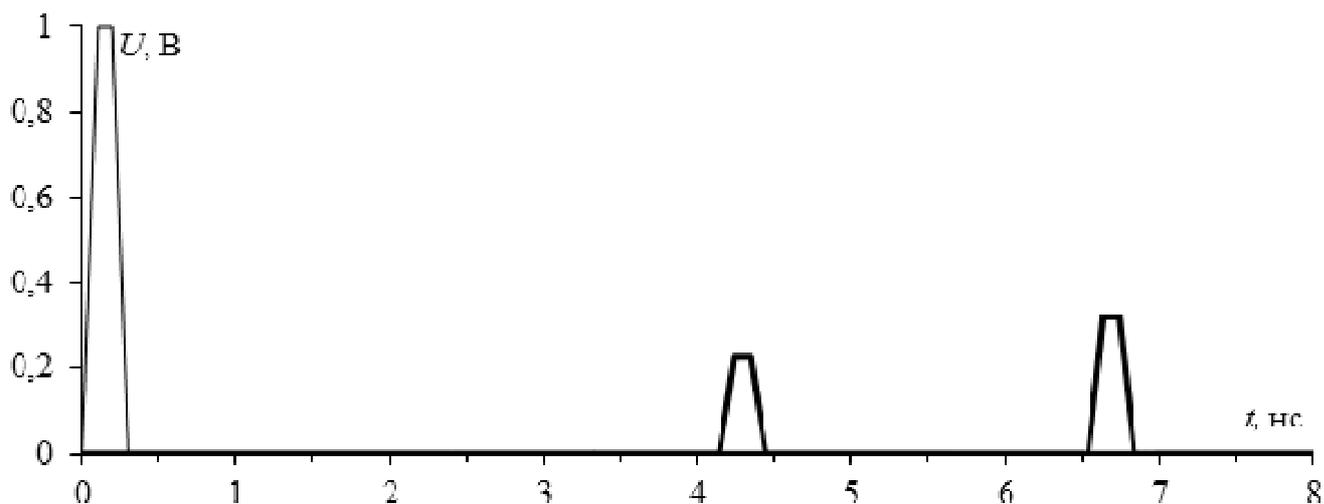


Рисунок 2.20 – Формы напряжения в начале (–) и конце (–) активного проводника структуры

2.3 Трехкратное резервирование

В данном разделе представлены 2 способа трехкратного МР: по материалам патента на изобретение [85] и статьи [86].

2.3.1 Способ резервирования для многослойных печатных плат

Предложен способ [85] трехкратного резервирования цепей (рисунок 2.21). Он похож на способ компоновки ПП из раздела 2.2.4, 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 плате, а две другие резервные цепи располагаются на резервной плате. Геометрические параметры проводников структуры: $w=430$ мкм, $t=105$ мкм, $s=50$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h_2=130$ мкм, расстояние от подложки до полигона земли $h_1=1000$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика $\epsilon_{r2}=20$, а подложек плат – $\epsilon_{r1}=4,25$. Номинал резисторов R выбран равным 30 Ом. Погонные задержки мод равны 6,9; 8,3; 11,5; 13,6 нс/м. Они вычислены как корень квадратный из собственных значений произведения матриц погонных коэффициентов электромагнитной и электростатической индукции четырехпроводной полосковой линии передачи, образованной при реализации предлагаемого способа.

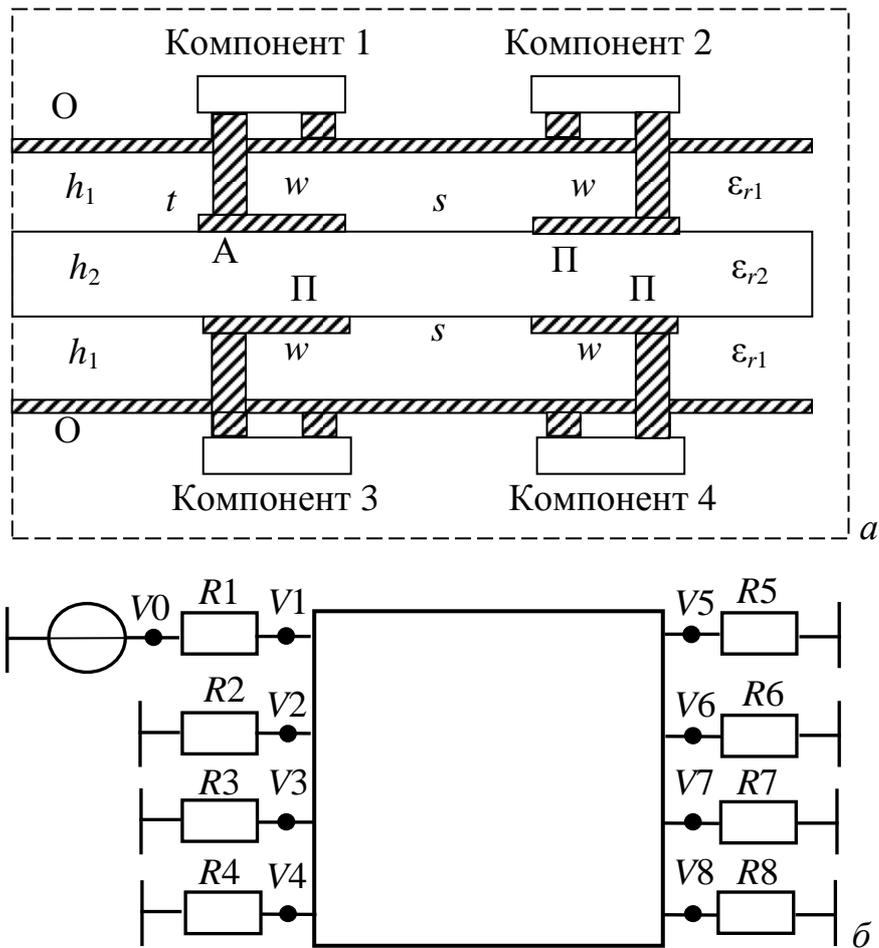


Рисунок 2.21 – Поперечное сечение структуры печатной платы, реализующей способ трехкратного резервирования, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

Импульсная помеха подавалась между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником, функцию резервных трасс выполняли пассивные проводники. Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы V1 и V5 на рисунке 2.21б) показывают 4 импульса разложения с амплитудами 0,12; 0,24; 0,16 и 0,19 В соответственно (рисунок 2.22), максимальная из которых в 4 раза меньше половины амплитуды воздействующей ЭДС.

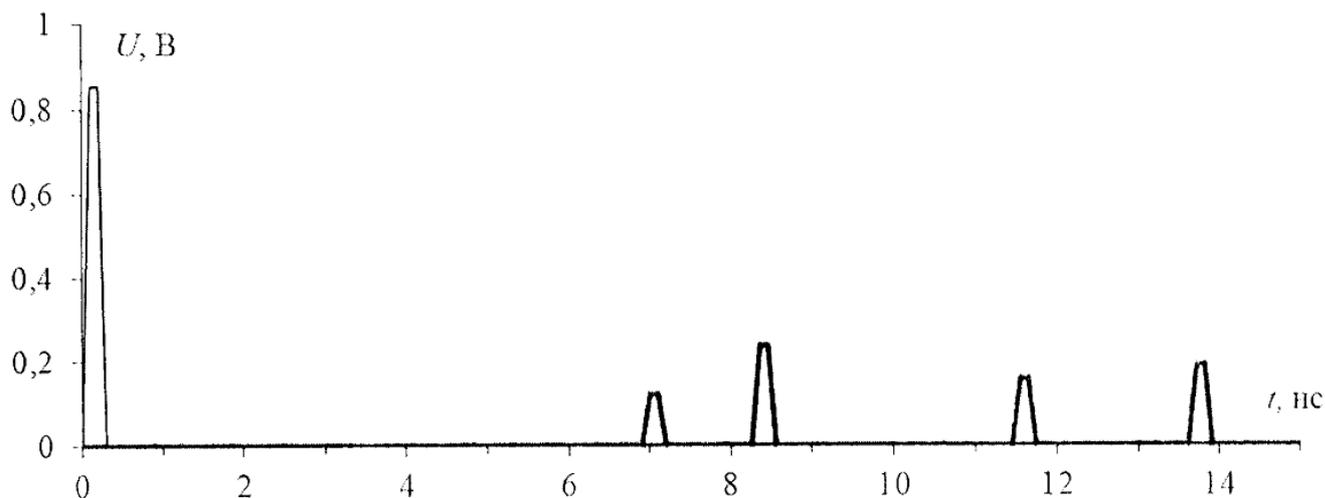


Рисунок 2.22 – Формы напряжения в начале (–) и конце (–) активного проводника структуры

2.3.2 Способ резервирования для двухсторонних печатных плат

В работе [86] предложен способ трехкратного резервирования межсоединений (рисунок 2.23а). Он похож на способ резервирования для ПП из раздела 2.2.3, но отличается тем, что каждый сигнальный проводник делится посредством зазора на 2 одинаковых проводника. Геометрические параметры проводников: $w=0,185$ мм, $w_1=100$ мм, $s=0,315$ мм, $d=0,630$ мм, $t=0,035$ мм. Толщина диэлектрической подложки $h=0,5$ мм; диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=4,5$.

При моделировании опорным проводником полагался один из крайних, тогда как 3 остальных полагались соединенными с ним на концах. СКИ подавался между резервируемым проводником (А) и одним из опорных (О). Функцию резервных проводников выполняют пассивные (П). Номинал резисторов $R1-R8$ взят равным (132 Ом) диагональным значениям (они одинаковы в силу зеркальной симметрии по двум плоскостям) матрицы импедансов \mathbf{Z} . Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемого проводника (узлы V1 и V5 на рисунке 2.23б) показывают

импульсы разложения с амплитудами около 0,25 В, т.е. ослабление в 4 раза (рисунок 2.24).

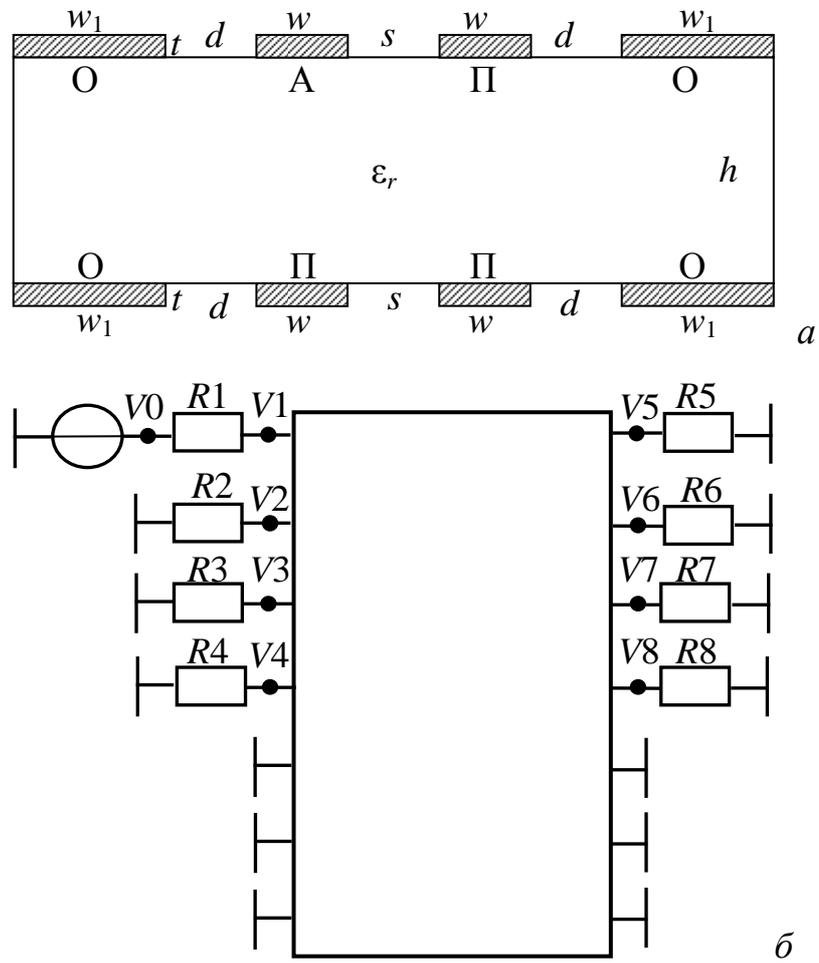


Рисунок 2.23 – Поперечное сечение (а) и схема моделирования (б) для предлагаемого способа трехкратного резервирования на основе двухсторонней ПП

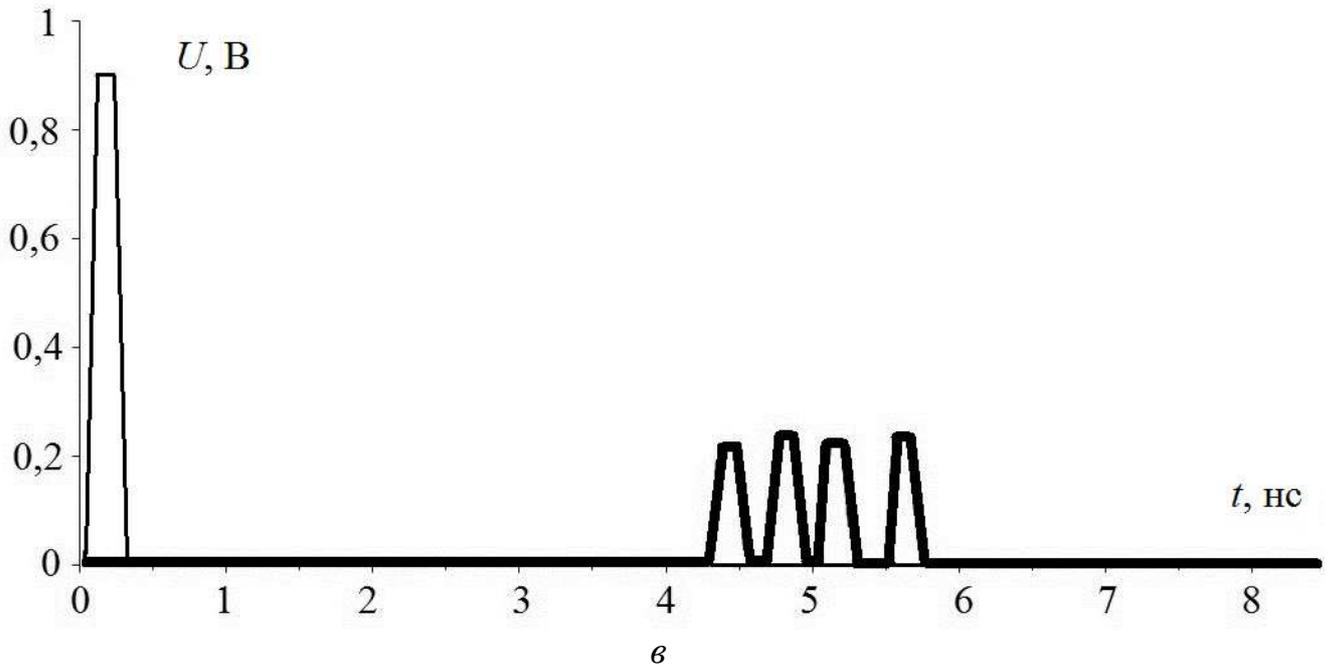


Рисунок 2.24 – Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В

2.4 Специфика, достоинства и недостатки способов модального резервирования

В разделе выполнен сравнительный анализ специфики, достоинств и недостатков представленных способов однократного (раздел 2.2) и трехкратного (раздел 2.3) МР.

Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием

Специфика. Базовый способ реализации (рисунок 2.1а). Обеспечивает торцевую связь между резервируемой и резервной трассами.

Достоинство. Реализация не требует сложного технического процесса изготовления ПП.

Недостатки. Реализация удобна только с компонентами, где резервная и резервируемая части выполнены в одном корпусе, а выводы – симметрично, либо попарно. Контроль ослабления и разности задержек мод можно осуществлять относительно малым набором и в малом диапазоне параметров поперечного

сечения. Из-за торцевой связи, коэффициент ослабления, как правило, не превышает 2, а разность погонных задержек мод – 2 нс/м.

Способ трассировки печатных проводников

с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием

Специфика. Отличается от базового способа реализации наличием дополнительного диэлектрического заполнения между резервируемой и резервной трассами (рисунок 2.4). Для улучшения характеристик модальной фильтрации его относительная диэлектрическая проницаемость должна быть значительно больше, чем у подложки. При этом значение погонной задержки нечетной моды больше, чем четной. Разность погонных задержек может менять знак.

Достоинства. Дополнительным диэлектрическим заполнением можно обеспечить более высокую разность погонных задержек мод и контролировать ее за счет выбора значения относительной диэлектрической проницаемости заполнения. С учетом реальных параметров стека ПП разность погонных задержек мод варьируется в довольно широком диапазоне 0,2...3,5 нс (частота первого нуля в диапазоне 0,14...2,7 ГГц). Несмотря на торцевую связь, коэффициент ослабления может быть более 2.

Недостатки. Реализация удобна только с компонентами, где резервная и резервируемая части выполнены в одном корпусе, а выводы – симметрично, либо попарно. Нанесение дополнительного покрытия для заполнения промежутка между резервируемой и резервной трассами усложняет технологию производства ПП.

Способ резервирования для печатных плат

Специфика. Проводящие слои двухсторонней ПП (ДПП) заполнены полигонами, являющимися опорными слоями для резервируемой и резервной трасс (рисунок 2.8а). Обеспечивает лицевую связь между резервируемой и резервной трассами.

Достоинства. Лицевая связь обеспечивает высокие значения ослабления и разности погонных задержек. Реализация способа не требует МПП, а возможна даже для ДПП.

Недостатки. Нарушается целостность опорного слоя. Затрудняется реализация плотной трассировки. Проводники опорного слоя могут заужаться.

Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием

Специфика. Размещение компонентов на противоположных склеиваемым сторонах резервируемой и резервной ПП (рисунок 2.11). Обеспечение лицевой связи между резервируемой и резервной трассами. Опорный проводник выполнен в форме двух полигонов. С учетом реальных параметров стека ПП и длины трасс, разность задержек мод может достигать 6 нс (частота первого нуля больше 0,083 ГГц).

Достоинства. Реализация не требует сложной технологии и сложной перетрассировки, поскольку резервируемые и резервные трассы выполнены на отдельных внутренних слоях МПП. Нет ограничений на элементную базу. Полигоны земли и питания выполняют роль экранов для межсоединений, находящихся на внутренних слоях.

Недостатки. Сложность изготовления, поскольку требуется технология МПП. Реализация требует установки компонентов на обе стороны МПП.

Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием

Специфика. Компоновка компонентов внутри ПП (рисунок 2.15). Обеспечение лицевой связи между резервируемой и резервной трассами.

Достоинство. Не только трассы, но и компоненты, экранированы полигонами опорных слоев.

Недостатки. Возможно использование только бескорпусной элементной базы. Габариты компонентов ограничивают снизу толщину диэлектрического слоя между полосками, ухудшая характеристики модальной фильтрации. Сложность реализации и изготовления.

Способ резервирования плоских кабелей

Специфика. Единственная реализация для плоского кабеля (рисунок 2.19а). Обеспечивает лицевую связь между резервируемой и резервной трассами. Опорные проводники выполнены в виде отдельных трасс, так что вдоль структуры распространяется более двух мод.

Достоинства. Обладает самым большим значением разности задержек мод, достигающим (с учетом реальных длин до 10 м) 19 нс (частота первого нуля снижается до 0,026 ГГц). Реализация не требует сложной технологии. При длинном кабеле (до ПП) позволяет значительное дополнительное ослабление помехового сигнала. Возможно внедрение в шлейф дополнительных трасс, которые будут выполнять функцию пассивного проводника.

Недостатки. Реализация может потребовать перепроектирования соединителей.

Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах

Специфика. По сравнению со способом компоновки ПП для цепей с резервированием, симметрично вводятся две дополнительные резервные цепи (рисунок 2.21а). Размещение компонентов на противоположных склеиваемых сторонах резервируемой и резервной ПП. Обеспечение лицевой и торцевой связей между резервируемой и резервными трассами. Опорный проводник выполнен в форме двух полигонов.

Достоинства. Трехкратное резервирование. Лицевая связь обеспечивает высокие значения ослабления и разности погонных задержек. Реализация не требует сложной технологии и сложной перетрассировки, поскольку резервируемые и резервные трассы выполнены на отдельных внутренних слоях МПП. Нет ограничений на элементную базу. Полигоны земли и питания выполняют роль экранов для межсоединений, находящихся на внутренних слоях.

Недостатки. Сложность изготовления, поскольку требуется технология МПП. Реализация требует установки компонентов на обе стороны МПП.

Способ трехкратного резервирования межсоединений

Специфика. По сравнению со способом резервирования для ПП, симметрично вводятся две дополнительные резервные цепи (рисунок 2.23а). Проводящие слои ДПП заполнены полигонами, являющимися опорными слоями для резервируемой и резервных трасс. Обеспечение лицевой и торцевой связей между резервируемой и резервными трассами.

Достоинства. Трехкратное резервирование. Лицевая связь обеспечивает высокие значения ослабления и разности погонных задержек. Реализация способа не требует МПП, а возможна даже для ДПП.

Недостатки. Нарушается целостность опорного слоя. Затрудняется реализация плотной трассировки. Проводники опорного слоя могут заужаться.

2.5 Основные результаты раздела

Рассмотрена идея МР. Представлены 6 способов однократного МР и 2 способа трехкратного МР. На 7 из этих способов получены патенты на изобретение, а на один из способов трехкратного МР подготовлена заявка на изобретение.

Показано, что применяя способы МР можно усилить защиту резервируемых и резервных цепей от СКИ, а также добиться уменьшения восприимчивости к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшения уровня кондуктивных эмиссий от этих цепей. Выявлено, что при гармонической помехе её амплитуда на определенных частотах минимизируется, поэтому на них можно ожидать уменьшения не только кондуктивных, но и излучаемых эмиссий, равно как и уменьшения восприимчивости, не только к кондуктивным, но и излучаемым воздействиям.

Предложены способы, позволяющие повысить надежность и обеспечить ЭМС при помощи МР. Оценены их специфика, достоинства и недостатки (раздел 2.4).

Несмотря на относительно малое количество способов МР, важно представить их эволюцию, что позволит быстро увеличить их количество в ближайшем будущем. Для этого можно взять за основу, так называемые, «линии развития», успешно использованные для любых технических систем в теории решения изобретательских задач [87]. Тогда, для рассмотренных и будущих способов МР, а возможно, и для устройств на их основе, можно представить следующие линии развития МР [88]:

1. Создание устройств на основе способа (различные устройства на основе одного способа, различные устройства на основе нескольких способов).

2. Трансформация опорного проводника (две плоскости, одна плоскость, одна плоскость и проводники, только проводники).

3. Использование опорного проводника для защиты компонентов (компоненты вблизи опорной плоскости, компоненты между опорными плоскостями).

4. Использование диэлектриков (существующих, дополнительных).

5. Увеличение кратности резервирования (однократное, многократное).

6. Использование симметрии (асимметрия, центральная симметрия, зеркальная симметрия по одной плоскости, зеркальная симметрия по двум плоскостям).

7. Совершенствование защиты от различных воздействий: по числу проводников (дифференциальное, синфазное и др.); по видам (гармоническое, периодические импульсы, одиночный импульс, электростатический разряд и др.); по параметрам (амплитуда, длительность, период повторения и др.).

8. Использование на разных структурных уровнях: плата, кабель, компонент, совместное.

Таким образом, системно представлены недавно предложенные способы МР, рассмотрены их особенности, достоинства и недостатки, а также сделана попытка показать эволюцию способов МР с помощью линий их развития. Это открывает возможность системного и эффективного развития представленных

способов для одновременного, в едином техническом решении, повышения надежности и обеспечения ЭМС критичной РЭА. Важно, что это достигается, не вводя дополнительных затратных аппаратных средств, а лишь за счет электромагнитной связи резервируемых межсоединений в неоднородном диэлектрическом заполнении, приводящей к явлению модального разложения нежелательного сигнала в цепях с МР. Примечательно, что при МР могут улучшаться показатели всех четырех аспектов ЭМС: кондуктивных эмиссий, излучаемых эмиссий, восприимчивости к кондуктивным эмиссиям, восприимчивости к излучаемым эмиссиям. Наилучшие показатели для особо важных (для конкретных приложений) из этих аспектов могут достигаться выбором весовых коэффициентов при многокритериальной оптимизации структур и параметров, обеспечивающих МР.

3 Реализация модального резервирования

3.1 Компоненты для модального резервирования

В данном разделе рассмотрены специальные компоненты для ПП с МР и предложен запатентованный способ компоновки неформованных компонентов [89].

3.1.1 Использование специальных компонентов

При конструировании ПП возникает необходимость в эффективном размещении компонентов РЭА. На ПП, используемых в КА, как правило, присутствует дефицит места и массы размещаемых электронных компонентов. Следовательно, возникает необходимость наиболее компактного размещения компонентов и сокращения их количества с целью улучшения массогабаритных показателей. Одно из решений для более качественного размещения компонентов на ПП – это замена дискретных компонентов на специальные компоненты и сборки.

С развитием электроники главными преимуществами электронного изделия становятся малые габариты, надежность, удобство монтажа и демонтажа (разборка оборудования), малое потребление энергии, а также удобство использования. Эти преимущества стали возможными с появлением SMD компонентов (Surface Mounted Device – компонент с поверхностным монтажом). Благодаря небольшим габаритам SMD компоненты можно разместить в большем количестве на единицу площади. Также в SMD компонентах очень малы паразитные параметры за счет небольших габаритов самих компонентов.

Есть примеры резисторных SMDборок, которые имеют отличные массогабаритные показатели, что позволяет применять их наряду с дискретными резисторными элементами, существенно экономя место и массу на ПП. Вид резисторныхборок CAT16-102J4 и CAT16-220J4 представлен на рисунке 3.1.

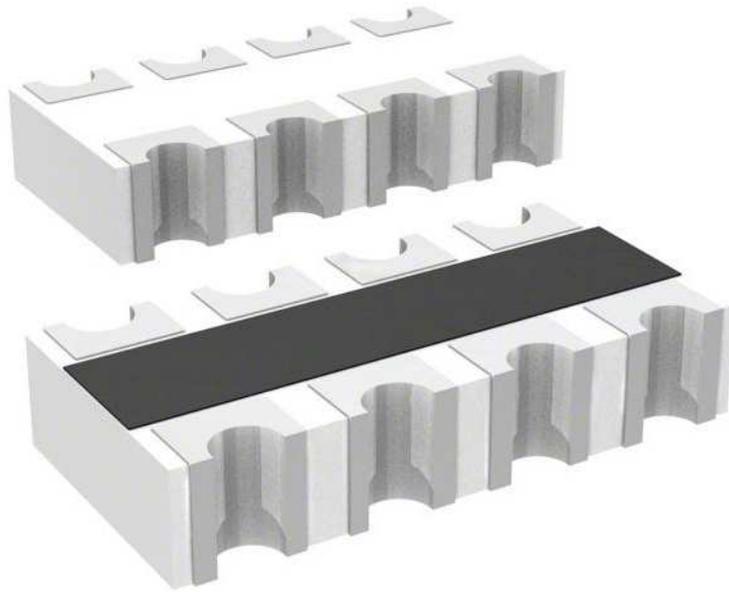


Рисунок 3.1 – Резисторные сборки

Пример SMD сборки конденсаторов, которая по массе и габаритным показателям имеет существенное преимущество по сравнению с дискретными аналогами, представляет конденсаторная сборка CA064C222K5RACTU (рисунок 3.2).

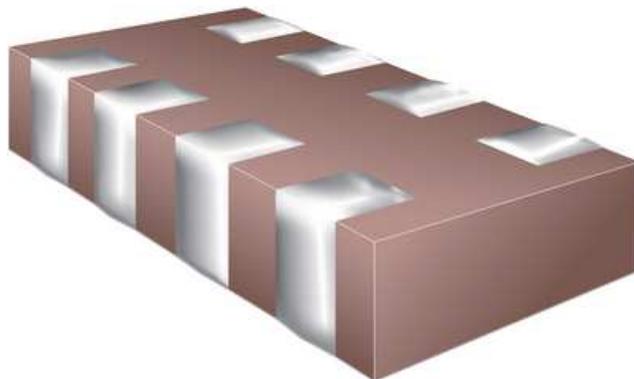


Рисунок 3.2 – Конденсаторная сборка

Существует отдельный вид помехоподавляющих конденсаторов, так называемые ХУ конденсаторы (ХУ capacitors). Они эффективны против различных видов электромагнитных помех. Х конденсаторы, которые подключают фазу и нейтраль к земле, эффективны для подавления симметричной синфазной помехи. У конденсаторы, которые подключаются между фазой и нейтралью, эффективны при подавлении асимметричной (дифференциальной) помехи.

Существуют сборки из помехоподавляющих конденсаторов. Так, конденсатор PZB300 представляет собой три емкости, соединенные в одном корпусе по типу «треугольник». На рисунке 3.3 показана сборка из помехоподавляющих конденсаторов.

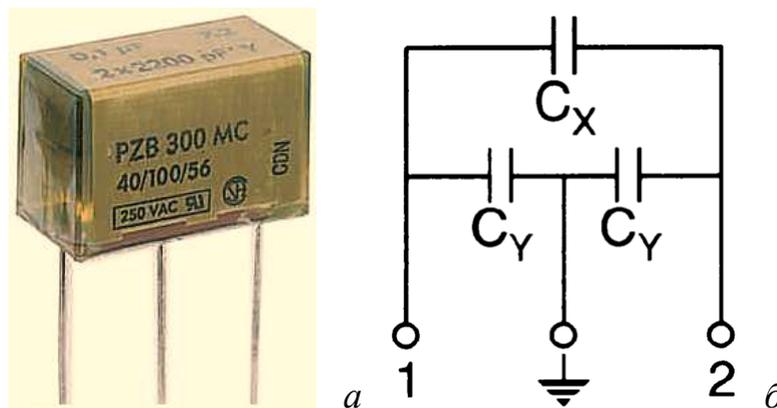


Рисунок 3.3 – Вид конденсаторной сборки ХУ типа (а) и принципиальная схема (б)

Технические данные: номинальное напряжение – 275 В, 50/60 Гц; значения емкости Х типа – 0,1 мкФ и 0,15 мкФ; значения емкости У типа – 0,0022 мкФ, 0,0033 мкФ, 0,15 мкФ и 0,0047 мкФ; шаг выводов – 20 мм; допускаемое отклонение емкости – $\pm 20\%$; температурный диапазон – $(-40...+100^{\circ}\text{C})$; высота – 16 мм; длина – 12,5 мм; ширина – 24 мм.

Использование помехоустойчивых ХУ конденсаторов позволяет эффективно бороться с симметричными и дифференциальными электромагнитными помехами. Это может дополнять и усиливать эффективность реализации МФ при использовании их для МР.

Замена дискретных элементов резисторными и конденсаторными сборками позволяет упростить осуществление модальной фильтрации при проектировании ПП с резервированием. Также применение сборок позволяет существенно экономить место на ПП. Например, конденсаторная сборка CA064C222K5RACTU (рисунок 3.2) позволяет сэкономить в 4 раза больше места на плате, так как по размеру эквивалентна одному дискретному элементу соответствующего типоразмера (рисунок 3.4).

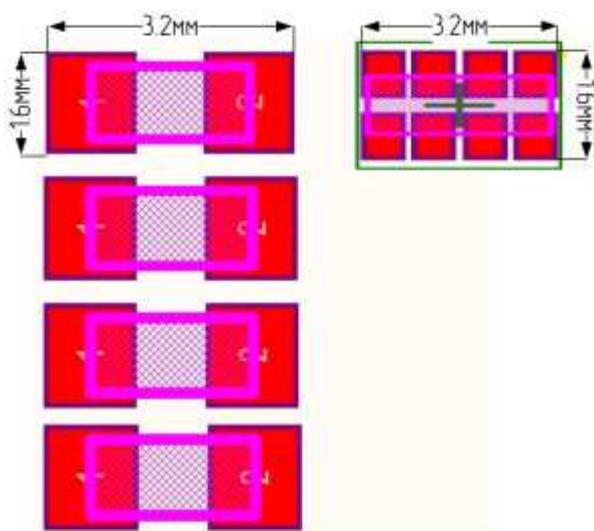


Рисунок 3.4 – Топологические посадочные места дискретного конденсатора и конденсаторной сборки

Резисторные сборки CAT16-102J4 и CAT16-220J4 (рисунок 3.1) занимают в 2 раза больше места, чем один дискретный элемент, но в 2 раза меньше места, чем эквивалентные этой сборке 4 дискретных элемента при размещении на ПП (рисунок 3.5). По своим характеристикам сборки идентичны дискретным компонентам.

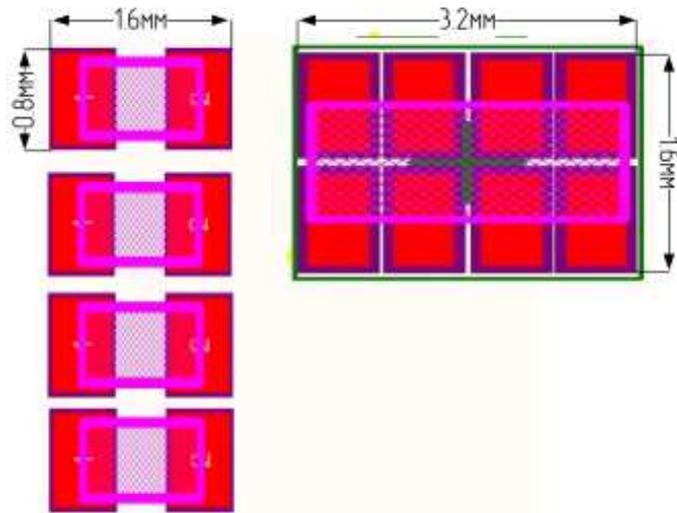


Рисунок 3.5 – Топологические посадочные места на ПП дискретного резистора и резисторной сборки

Замена крупных штыревых соединителей аналогичными по характеристикам SMD соединителями позволяет разместить их на разных сторонах ПП симметрично один относительно другого, что облегчает реализацию модальной фильтрации при подведении проводников к выводам этих элементов схемы (рисунок 3.6).

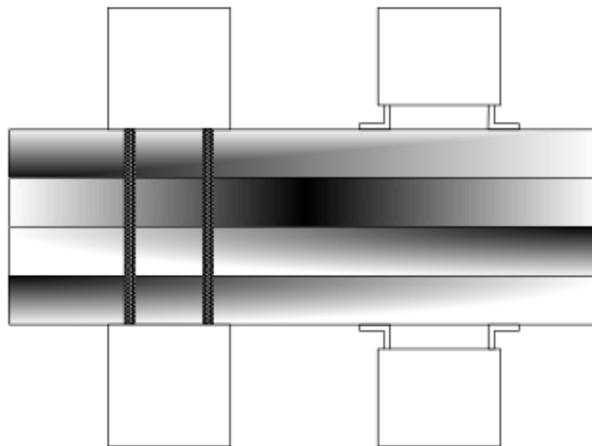


Рисунок 3.6 – Сравнение резервирования штыревого и планарного соединителей

3.1.2 Способ компоновки неформованных компонентов

В данном разделе описан способ компоновки неформованных компонентов [89] для МР.

Наиболее близким по техническому решению является выбранный за прототип способ компоновки ПП для цепей с резервированием [82]. Недостатком этого способа является отличие в трассировке резервируемой и резервной плат, обусловленное асимметричным положением выводов корпусов радиоэлектронных компонентов относительно слоя диэлектрика, склеивающего резервируемую и резервную платы, так что одноименные выводы компонентов оказываются не друг под другом (рисунок 3.7а). Из-за этого уменьшается длина отрезков связанных линий, образованных одноименными трассами резервной и резервируемых цепей в области трассировки выводов, что уменьшает полезные взаимные влияния за счет электромагнитных связей между резервируемой и резервной одноименными трассами резервируемой и резервной плат.

Предлагается способ компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на ПП для цепей с резервированием, отличающийся от прототипа тем, что формовка выводов резервируемых компонентов выполняется в одном направлении относительно плоскости корпуса компонента, а резервных – в обратном, а соответствующие друг другу резервируемые и резервные радиоэлектронные компоненты размещаются друг под другом.

Техническим результатом является уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшение уровня кондуктивных эмиссий от резервируемой цепи (в случае выхода из строя резервируемой цепи в резервной цепи будет достигаться аналогичный технический результат).

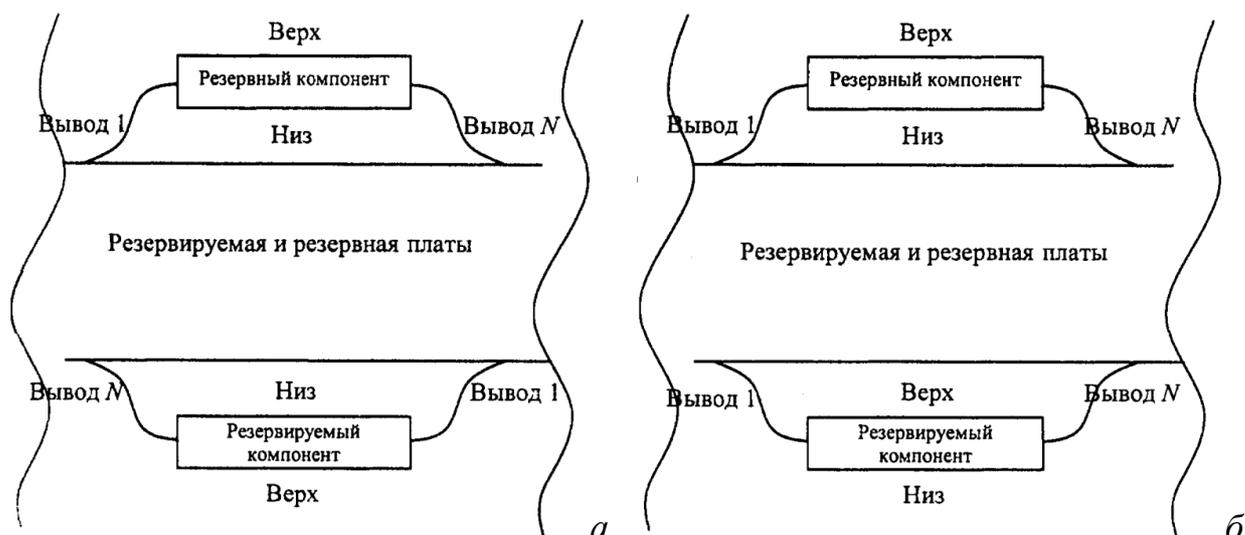


Рисунок 3.7 – Схематичное изображение формовки корпусов радиоэлектронных компонентов и взаимного расположения выводов в прототипе (*а*) и предлагаемом способе (*б*)

Технический результат достигается симметричным положением выводов корпусов радиоэлектронных компонентов относительно слоя диэлектрика, склеивающего резервируемую и резервную платы, так что одноименные выводы компонентов оказываются друг под другом (рисунок 3.7б). Из-за этого не уменьшается длина отрезков связанных линий, образованных одноименными трассами резервной и резервируемых цепей в области трассировки выводов, и не уменьшаются полезные взаимные влияния за счет электромагнитных связей между резервируемой и резервной одноименными трассами резервируемой и резервной плат. В итоге, помеховый импульс, длительность которого меньше разности задержек четной и нечетной мод в структуре связанной линии, образованной парой проводников резервируемой и резервной цепей и опорными проводниками, выполненными в виде плоскости, подвергается разложению на импульсы меньшей амплитуды, а помеха на заданной частоте может значительно ослабляться. Достижимость технического результата продемонстрирована на примере, совпадающем с описанным в разделе 2.2.4.

3.2 Модальное резервирование в системе автономной навигации космического аппарата

В данном разделе представлены варианты применения МР при конструировании блока цифровой обработки сигналов (ЦОС), радиоприемного устройства (РПУ) и источника питания (ИП) САН КА [67].

3.2.1 Блок цифровой обработки сигнала

Для пробной реализации МР цифровой схемы, в качестве исходной взята ПП блока ЦОС САН КА. Применялись 2 типа связи: торцевая и лицевая (рисунок 3.8).

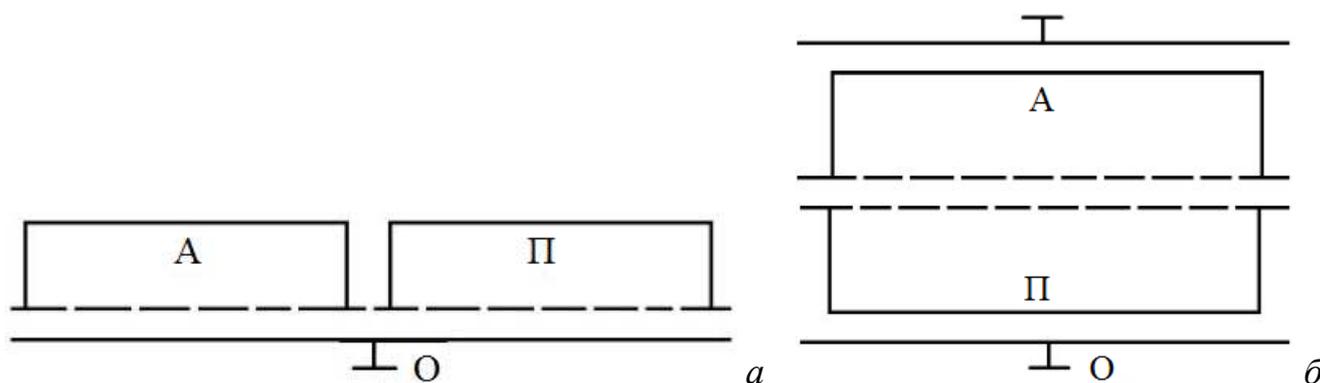


Рисунок 3.8 – Поперечное сечение структуры с МФ с торцевой (а) и лицевой (б) связями, где проводники:

А – активный; П – пассивный; О – опорный

Работа по реализации МР на ПП проводилась впервые, и уже на этапе компоновки ПП было выявлено, что для реализации МФ этих типов целесообразно компоновать радиоэлектронные компоненты попарно и попарно симметрично. Для первого типа, надо располагать резервируемые и резервирующие компоненты максимально близко друг к другу на одной стороне ПП, во втором – на противоположных.

Компоновка для первого типа эффективна, если ПП содержит малое количество компонентов, и нет ограничения ПП по площади. В случае ПП блока

ЦОС (рисунок 3.9), второй тип более предпочтителен и ведет к рациональному размещению компонентов на разных сторонах ПП (рисунок 3.10).

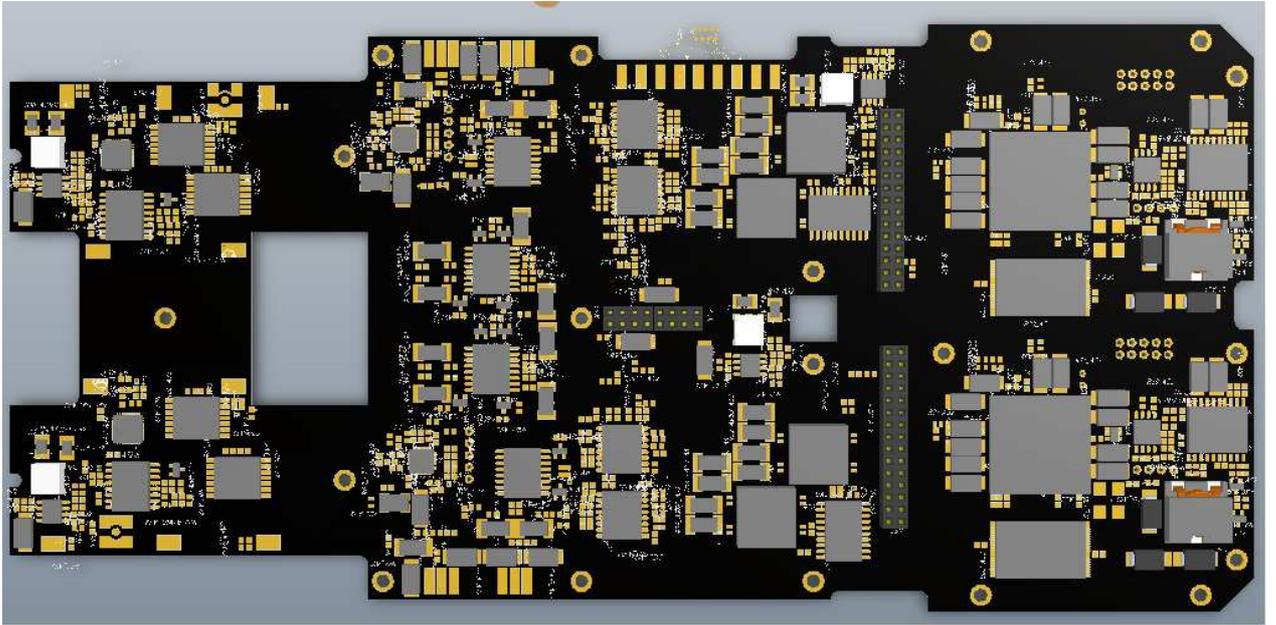


Рисунок 3.9 – Исходная ПП блока ЦОС, вид сверху

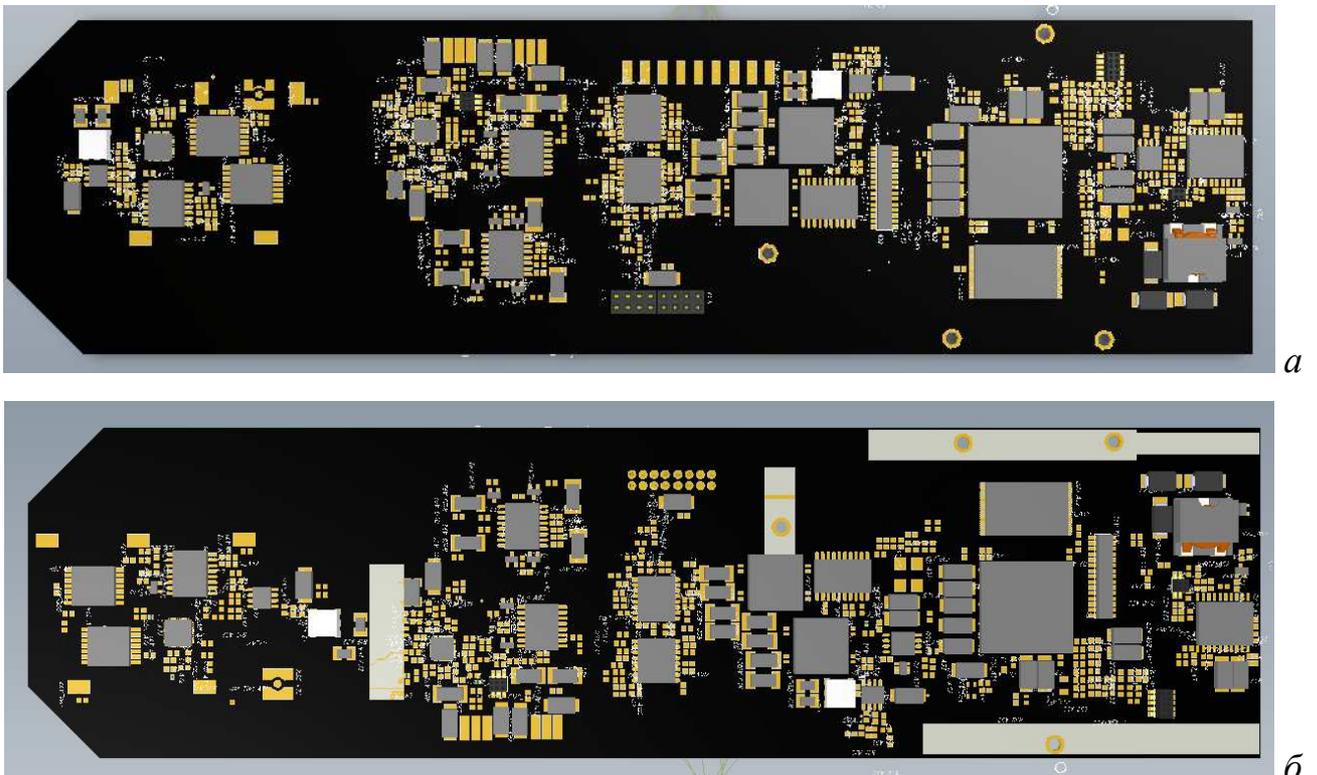


Рисунок 3.10 – Виды сверху (а) и снизу (б) ПП блока ЦОС с МР

В процессе конструирования, на ПП блока ЦОС удалось реализовать 22 трассы с лицевой связью и 9 трасс с торцевой связью. Длины участков трасс, с реализованной торцевой и лицевой связями, сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Длины участков трасс с МФ

Трассы с лицевой связью						Трассы с торцевой связью					
№	l, мм	№	l, мм	№	l, мм	№	l, мм	№	l, мм	№	l, мм
1	157	7	57	13	57	19	78	1	32	6	12
2	86	8	87	14	101	20	22	2	33	7	20
3	173	9	78	15	112	21	31	3	28	8	15
4	46	10	52	16	115	22	45	4	49	9	61
5	50	11	20	17	20			5	23		
6	82	12	64	18	64						

В результате решения задач конструирования ПП блока ЦОС САН КА с резервированием и реализацией МФ возникли следующие трудности:

1. Отсутствие симметричного расположения выводов элементов с высокой степенью интеграции.
2. Наличие штыревых элементов, препятствующих расположению их друг под другом.
3. Сложность трассировки из-за большого количества сквозных переходных отверстий.
4. Необходимость введения дополнительного сигнального слоя для реализации лицевой МФ.

Найдены следующие решения:

1. Добавлен сигнальный слой для реализации МФ и трассировки цепей.
2. Заменены штыревые элементы на планарные.
3. Используются несквозные переходные отверстия.
4. Уменьшена площадь исходной ПП блока ЦОС САН КА на 40% за счет переноса пассивных (резервируемых) элементов на противоположную сторону ПП.
5. Реализованы торцевая и лицевая связи.

6. Применена лицевая связь, как наиболее легко реализуемая на ПП такого типа.

Введение дополнительных слоев для реализации лицевой связи усложнило структуру ПП, однако двухстороннее размещение компонентов на разных сторонах ПП позволило уменьшить исходные габариты почти в 1,5 раза (260 мм x 125 мм против 281 мм x 75,5 мм).

3.2.2 Радиоприемное устройство

Для пробной реализации МР в ПП аналоговой схемы в качестве исходной взята ПП радиоприемного устройства (РПУ) САН КА. Также применялись 2 типа связи: торцевая и лицевая (рисунок 3.8).

Необходимо разместить большое количество компонентов, поэтому попарная компоновка не является оптимальной (при этом необходимо учитывать увеличение площади ПП, а также то, что появляются затруднения в трассировке). На ПП РПУ (рисунок 3.11), попарно симметричное размещение компонентов более предпочтительно, с учетом того, что выполнение полной симметрии элементов невозможно при зеркальном расположении элементов и ведет к рациональному размещению элементов на разных сторонах ПП (рисунок 3.12).

В процессе работы по интеграции МФ на ПП РПУ получилось реализовать 9 трасс с лицевой МФ и только 2 трассы с торцевой МФ. Длины участков трасс, с реализованной торцевой и лицевой МФ, сведены в таблице 3.2.

Для реализации лицевой МФ на ПП РПУ потребовалось введение дополнительных слоев, что усложнило структуру ПП. Однако двухстороннее размещение компонентов на разных сторонах ПП позволило уменьшить исходные габариты в 2 раза (85,3 мм x 125 мм против 64 мм x 85,5 мм). Общая длина на 9 трассах с лицевой МФ составила 122 мм. Для торцевой МФ удалось реализовать только 2 трассы общей длиной 21 мм.

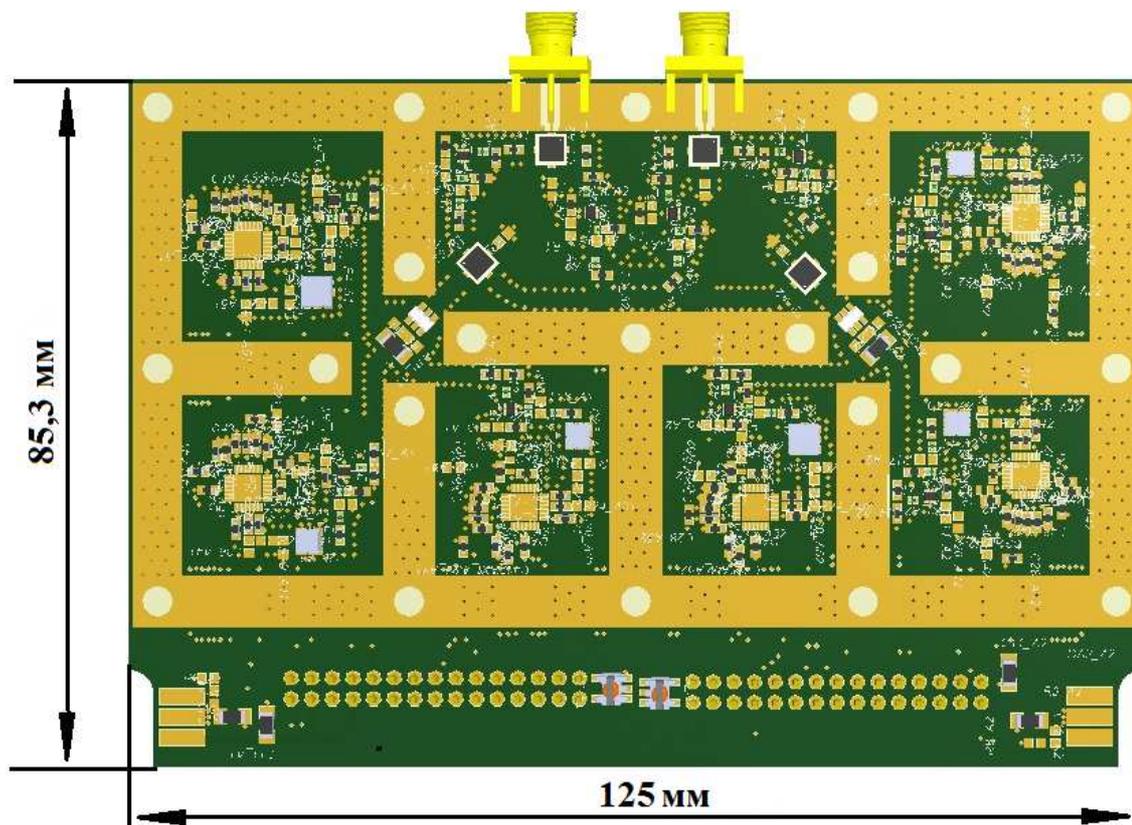


Рисунок 3.11 – Вид сверху исходной ПП РПУ

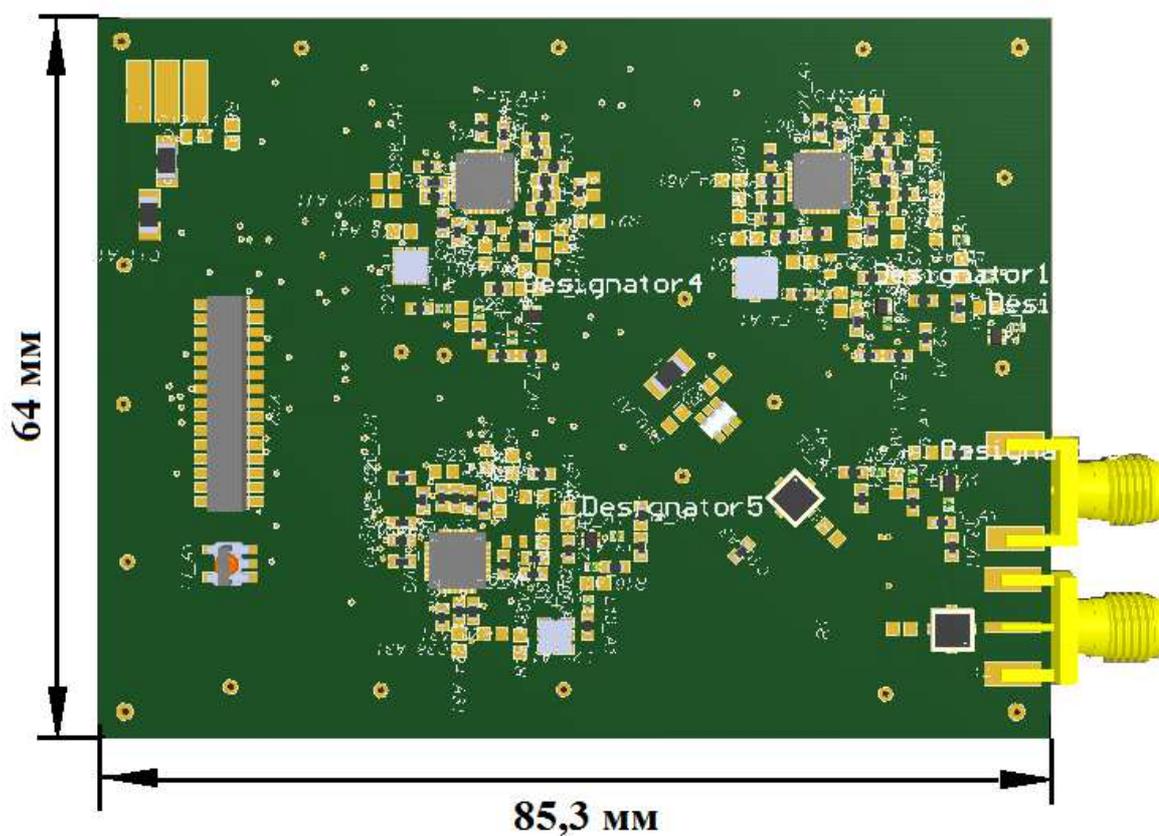


Рисунок 3.12 – Вид сверху ПП РПУ с МР

Таблица 3.2 – Длины участков трасс с МФ

Трассы с лицевой связью				Трассы с торцевой связью	
№	<i>l</i> , мм	№	<i>l</i> , мм	№	<i>l</i> , мм
1	9	7	12	1	9
2	23	8	20	2	12
3	6	9	17		
4	11				
5	24				

В результате решения задач конструирования ПП РПУ возникшие трудности и найденные решения полностью повторяют таковые в ПП блока ЦОС (раздел 3.2.1). Спецификой ПП РПУ является малая длина трасс.

3.2.3 Источник питания

Для пробной реализации МР в ПП ИП использована ПП ИП САН КА (рисунок 3.13). Также применялись два типа связи: торцевая и лицевая. Вследствие малых габаритов ПП и незначительного количества элементов РЭА, оба типа равноценны и ведут к удобному размещению компонентов на разных сторонах ПП (рисунок 3.14).

Для реализации лицевой связи потребовалось введение дополнительных слоев, что усложнило структуру ПП. Однако двухстороннее размещение компонентов на разных сторонах ПП позволило уменьшить исходные габариты почти в 2 раза (57,5 мм x 87,5 мм против 95 мм x 87,5 мм).

Длины участков трасс с торцевой и лицевой связями, сведены в таблице 3.3. Общее количество цепей на ПП ИП невелико, поэтому удалось реализовать 2 трассы с лицевой связью и 4 – с торцевой.

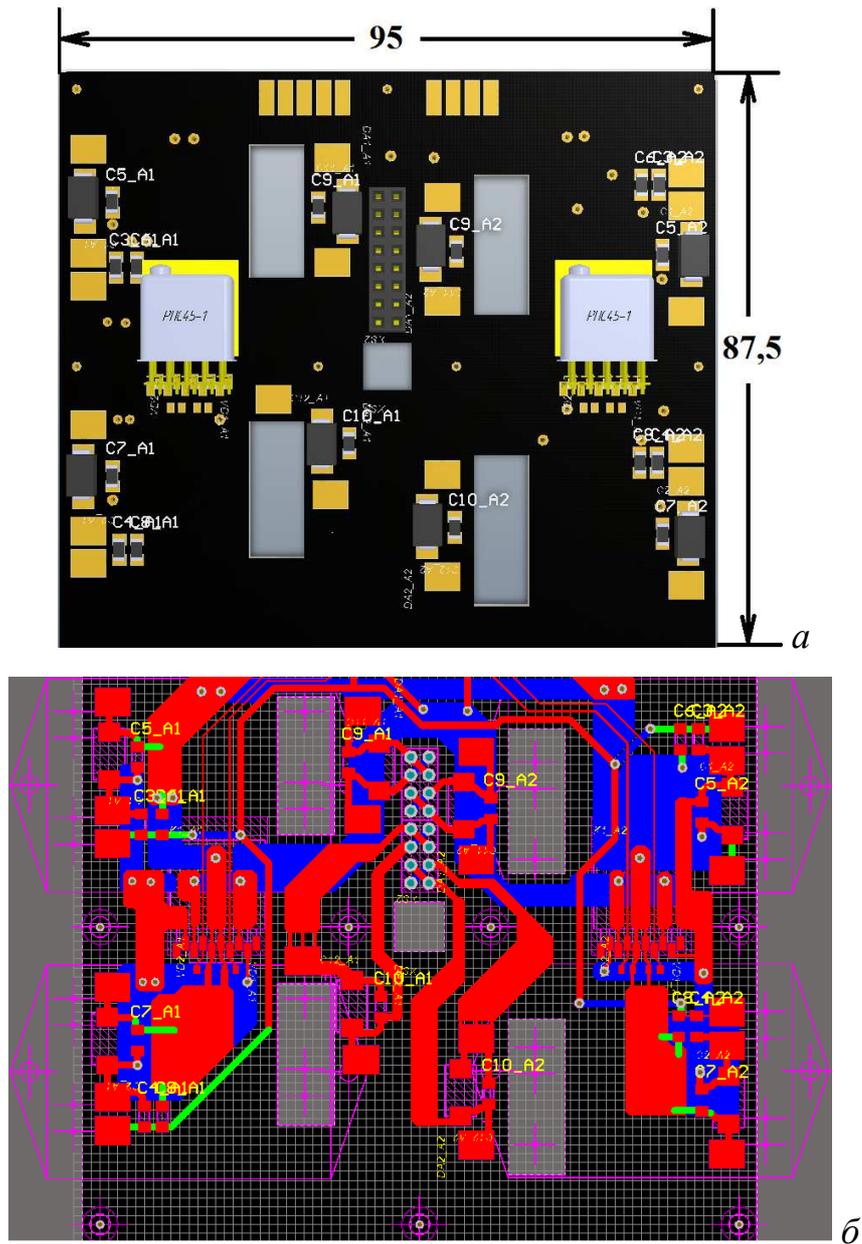


Рисунок 3.13 – Исходная ПП ИП САН КА: а) 3D модель (4 DC/DC преобразователя не показаны); б) 2D модель (2 сигнальных слоя)

Таблица 3.3 – Длины участков трасс с МФ

Трассы с лицевой связью			Трассы с торцевой связью				
№	1	2	№	1	2	3	4
$l, \text{ мм}$	216	116	$l, \text{ мм}$	43	43	149	177

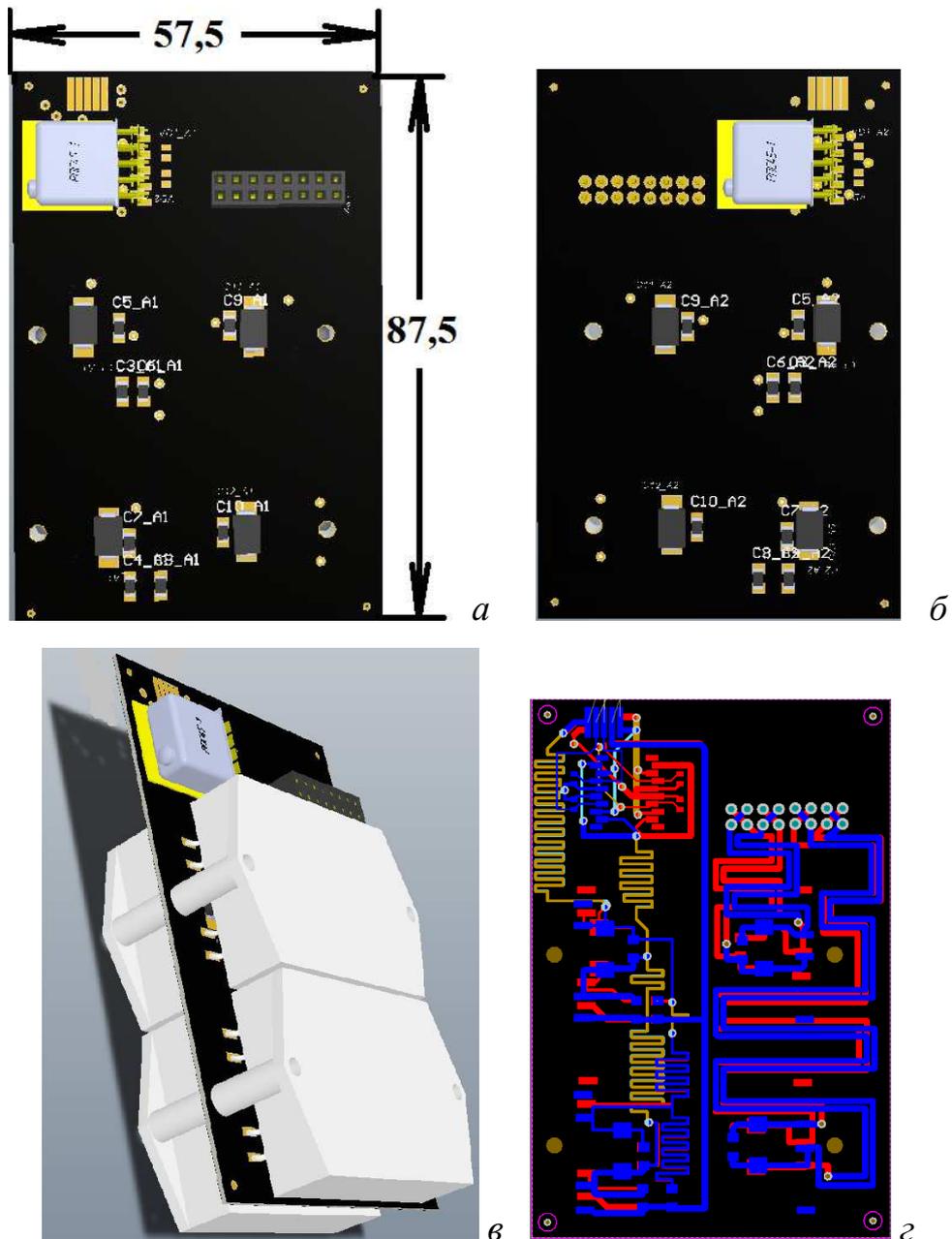


Рисунок 3.14 – ПП ИП с МФ: а) и б) виды сверху и снизу 3D модели соответственно (DC/DC преобразователи не показаны), в) 3D модель (изометрия), г) 2D модель (4 сигнальных слоя, полигоны «земли» не показаны)

В ходе проделанной работы удалось уменьшить габариты ПП ИП почти в 2 раза по площади, реализовать МФ с лицевой и торцевой связями. Однако, вследствие малой длины трасс из-за малой площади ПП ИП и малого количества элементов, была искусственно увеличена длина некоторых трасс путем создания меандровых линий. Это не всегда хорошо сказывается на работе аналоговых схем

источников питания, поэтому подобный прием следует применять с осторожностью. В целом реализация МР не сказалась на усложнении компоновки и трассировки ПП ИП (кроме удвоения количества слоев, что в простой ПП не является критичным).

3.2.4 Выводы

При МР попарно симметричное расположение элементов способствует реализации лицевой связи в большей мере, чем торцевой, вследствие удобства зеркальной трассировки резервируемой и резервной цепей. Чем выше плотности компоновки и трассировки ПП, чем больше на ПП асимметричных элементов с высокой интеграцией выводов, тем тяжелее реализовать МФ. Чем больше дискретных симметричных элементов, протяженных цепей, слоев ПП, тем проще реализовать МФ. Следовательно, данный способ защиты от электромагнитных помех целесообразно реализовывать на более простых и протяженных ПП или на ПП с малым количеством элементов.

3.3 Квазистатическое моделирование распространения сверхкороткого импульса

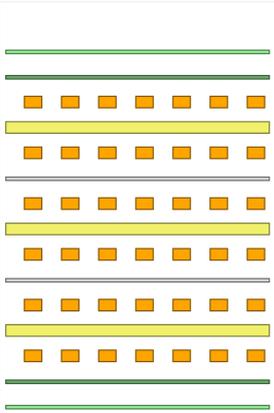
В данном разделе представлены результаты моделирования различных цепей ПП с МР.

3.3.1 Блок цифровой обработки сигнала

В данном разделе рассмотрено [90] распространение СКИ вдоль трасс резервируемых цепей ПП блока ЦОС САН КА для цепей: без МР; с МР без изменения параметров стека ПП; с МР, при увеличенном значении относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_r=10$) слоя между резервным и резервируемым проводниками.

3.3.1.1 Моделирование цепей без модального резервирования

В качестве исследуемой структуры выбрана ПП блока ЦОС для САН КА [91] (рисунок 3.15). В качестве исследуемой выбрана цепь A/B_DAC_A52. Она проходит по слоям «top layer», «signal layer 3» и «bottom layer». При моделировании распространения сигнала помехи, необходимо учитывать влияния соседних межсоединений в реальной ПП. Поскольку эти влияния по длине меняются, ПП необходимо разбить на фрагменты.



Layer Name	Type	Material	Thickness (mm)	Dielectric Material	Dielectric Constant	Pullback (mm)	Orientation	Coverlay Expansion
Top Overlay	Overlay							
Top Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.01016	Solder Resist	3.5			0
Top Layer	Signal	Copper	0.03556				Top	
Dielectric 1	Dielectric	Core	0.254	FR-4	4.2			
GND	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 3	Dielectric	Prepreg	0.127		4.2			
Pitanie	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 4	Dielectric	Core	0.254		4.2			
Signal Layer 3	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 5	Dielectric	Prepreg	0.127		4.2			
GND2	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 2	Dielectric	Core	0.254		4.2			
Bottom Layer	Signal	Copper	0.03556				Bottom	
Bottom Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.01016	Solder Resist	3.5			0
Bottom Overlay	Overlay							

Рисунок 3.15 – Стек слоев на ПП блока ЦОС САН КА без МР

На рисунке 3.16 показаны, примеры моделей поперечного сечения фрагментов исследуемой цепи при учете влияния соседних межсоединений. На рисунке 3.16а изображена модель трассы, проходящей на слое «top layer» (для слоя «bottom layer» модель идентична), где h_1 , ϵ_{r1} и h , ϵ_{r2} – толщины и относительные диэлектрические проницаемости слоев «top solder» и «dielectric 1» соответственно, w – ширина проводников, t – толщина проводников, s – расстояние между проводниками, d – расстояние до края диэлектрика. На рисунке 3.16б изображена модель поперечного сечения фрагмента трассы, проходящей на слое «signal layer 3», где h_2 и h – толщины слоев «dielectric 4» и «dielectric 5» соответственно, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость слоев «dielectric 4» и «dielectric 5», w – ширина проводников, t – толщина проводников, s – расстояние между проводниками, d – расстояние до края диэлектрика.

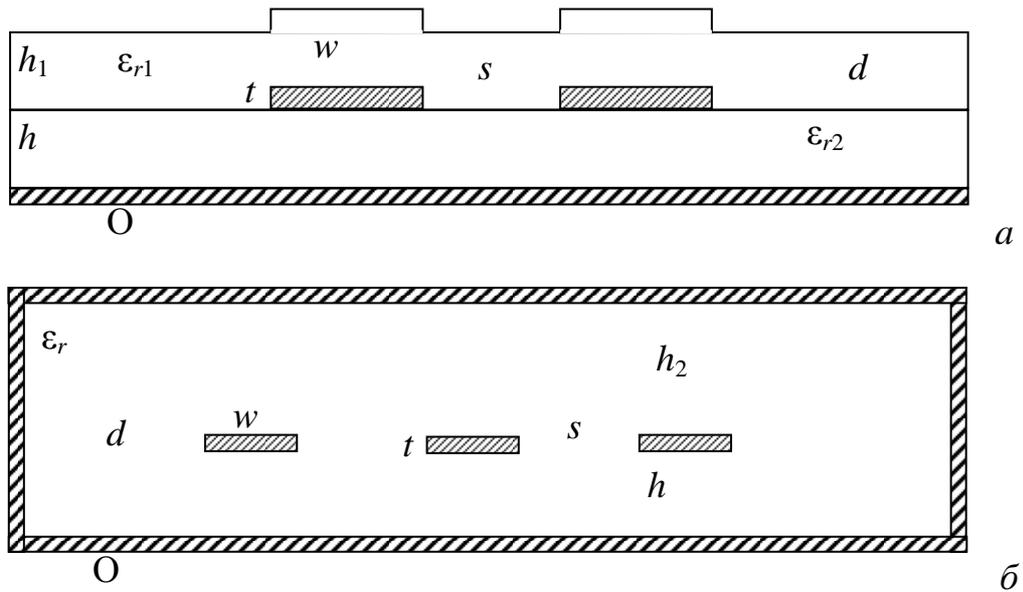


Рисунок 3.16 – Модели поперечных сечений структуры МПП

для трасс проходящих на слоях «top layer», «bottom layer» (а) и «signal layer 3» (б)

При построении моделей фрагментов ПП (рисунок 3.17), использованы неизменяемые параметры стека ПП, приведенные на рисунке 3.15. Модели фрагментов ПП с модальным резервированием и их изменяемые геометрические параметры сведены в таблице 3.4. Для каждой из моделей в системе TALGAT вычислены матрицы индуктивностей и емкостей.

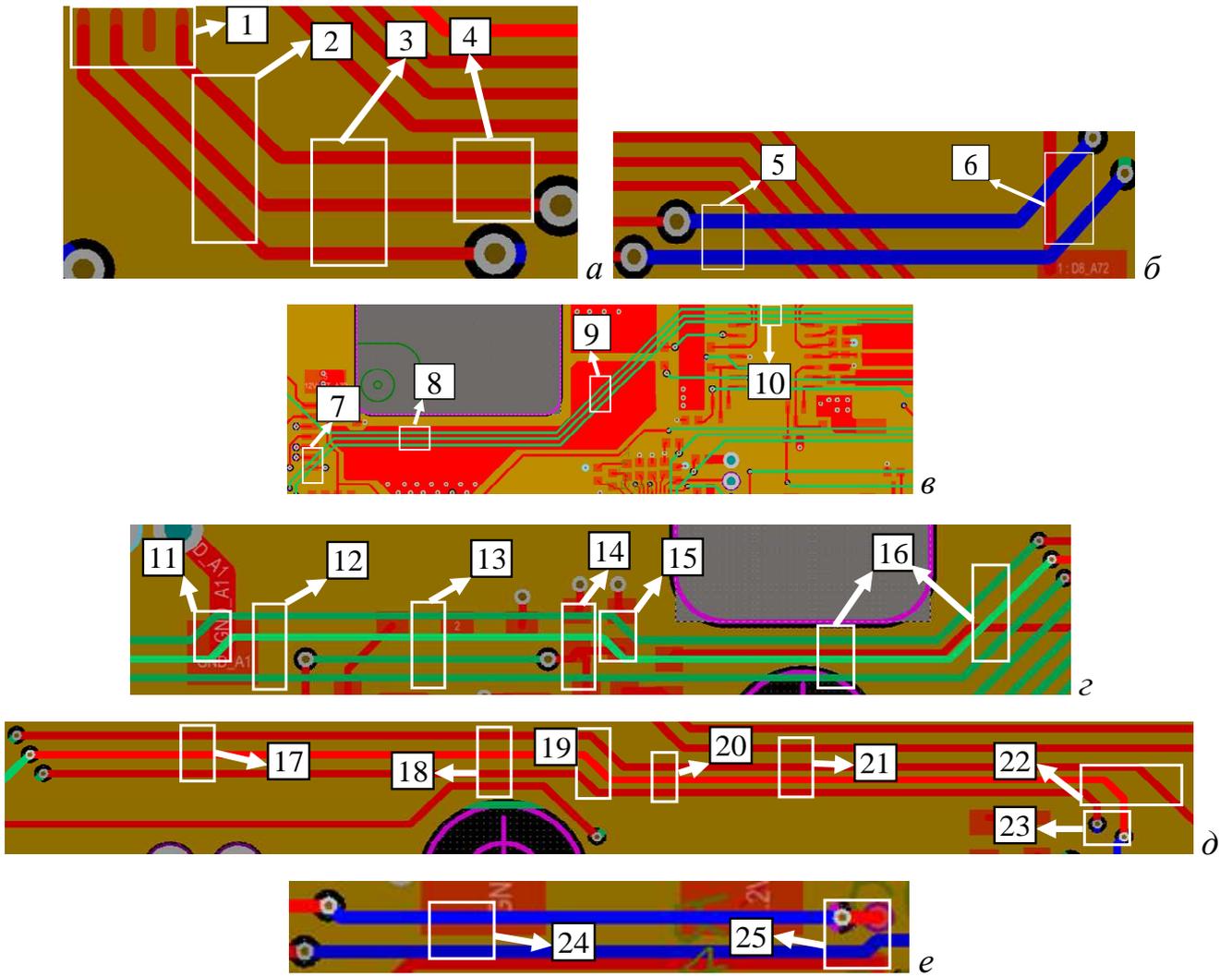


Рисунок 3.17 – Фрагменты ПП с исследуемой цепью (A/B_DAC_A52):

а) 1 – 4; б) 5 и 6; в) 7 – 10; з) 10 – 16; д) 17 – 23; е) 24 – 25

Таблица 3.4 – Модели фрагментов ПП и их геометрические параметры

№	Геометрические параметры, мм			Модели фрагментов ПП	№	Геометрические параметры, мм			Модели фрагментов ПП
	l	w	s_1			l	w	s_1	
			s_2					s_2	
1	0,5	0,2	0,8		14	2,13	0,3	0,575	
			0,4					1,325	
			-					-	
2	3,18	0,2	0,507		15	1,14	0,3	0,761	
			0,3					-	
			-					-	
3	3,5	0,2	0,55		16	18,41	0,2	0,45	
			0,55					0,45	
			-					-	
4	1	0,2	0,55		17	15,75	0,3	0,45	
			-					0,45	
			-					-	
5	8	0,2	0,45		18	3,5	0,3	0,45	
			-					0,45	
			-					0,2	
6	2,48	0,3	0,761		19	2,91	0,3	0,45	
			-					0,45	
			-					-	
7	8,18	0,3	0,407		20	2,25	0,3	0,2	
			-					-	
			-					-	
8	27	0,3	0,450		21	15,75	0,3	0,45	
			0,450					0,2	
			-					0,2	
9	21,21	0,3	0,407		22	1,07	0,3	0,962	
			0,407					0,611	
			-					-	
10	55	0,3	0,450		23	1	0,3	0,7	
			0,450					-	
			-					-	
11	1,24	0,3	0,761		24	10,5	0,3	0,45	
			-					-	
			-					-	
12	2,88	0,3	0,575		25	0,75	0,3	0,7	
			1,325					-	
			-					-	
13	9,5	0,3	0,575						
			0,575						
			0,575						

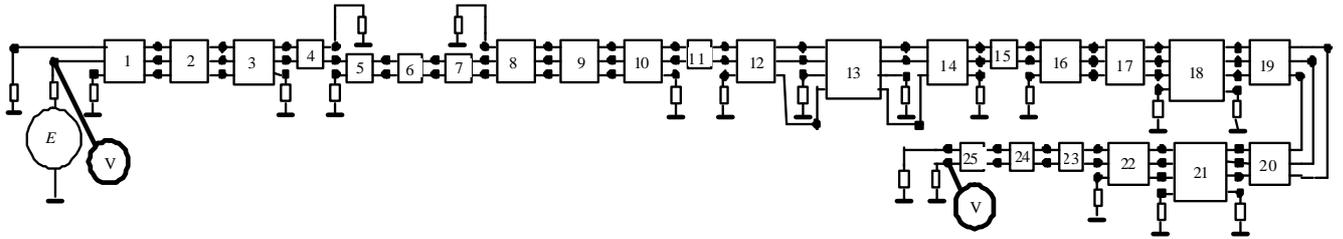


Рисунок 3.18 – Принципиальная схема цепи
для моделирования распространения СКИ на участках ПП

На рисунке 3.18 представлена электрическая схема цепи, построенная в системе TALGAT, для моделирования распространения импульсного сигнала вдоль трасс ПП. На всех концах трасс полагались сопротивления 50 Ом. Вычисленные первичные параметры фрагментов ПП (матрицы индуктивностей и емкостей) заносятся в соответствующий блок схемы цепи. На вход цепи «A/B_DAC_A52» подается СКИ с ЭДС 5 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс. Временной отклик приведен на рисунке 3.19. Выходное напряжение (2,2 В) по отношению к половине ЭДС (2,5 В) уменьшилось незначительно.

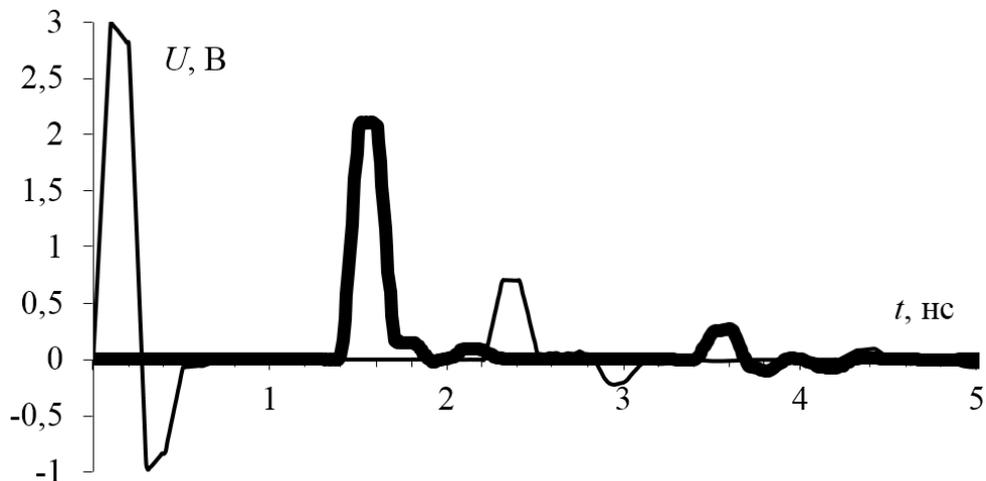
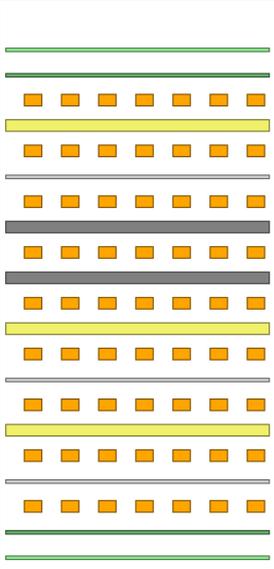


Рисунок 3.19 – Формы напряжения на ближнем (←) и дальнем (⇒) концах цепи
без модального резервирования

3.3.1.2 Моделирование цепей с модальным резервированием

В качестве исследуемой структуры выбрана та же ПП блока ЦОС для САН КА, но с реализацией МР. В рассматриваемой МПП (рисунок 3.20) МР выполнено на сигнальных слоях (Signal1 и Signal2). В качестве внутреннего слоя (core) используется ламинированный медью стеклотекстолит (Dielectric 5). Опорные слои состоят из медной фольги (Dielectric 3, Dielectric 5), спрессованной с внутренними слоями при помощи связующего смолистого материала (prepreg). Полигоны «Dop» и «Dop2» экранируют слои, на которых осуществляется МР, поэтому в анализе другие слои не учитываются, поскольку электромагнитная связь между ними мала.



Layer Name	Type	Material	Thickness (mm)	Dielectric Material	Dielectric Constant	Pullback (mm)	Orientation	Coverlay Expansion
Top Overlay	Overlay							
Top Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.01016	Solder Resist	3.5			0
Top Layer	Signal	Copper	0.03556				Top	
Dielectric 1	Dielectric	Core	0.254	FR-4	4.2			
Pitanie	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 7	Dielectric	Prepreg	0.127		4.2			
Mid-Layer 4	Signal	Copper	0.03556				Not Allowed	
Dielectric 6	Dielectric	None	0.32004	FR-4	4.8			
Mid-Layer 5	Signal	Copper	0.03556				Not Allowed	
Dielectric 8	Dielectric	None	0.32004	FR-4	4.8			
DOP	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 3	Dielectric	Core	0.254		4.2			
Signal1	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 5	Dielectric	Prepreg	0.127		4.2			
Signal2	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 4	Dielectric	Core	0.254		4.2			
Dop2	Signal	Copper	0.036				Not Allowed	
Dielectric 11	Dielectric	Prepreg	0.127		4.2			
Bottom Layer	Signal	Copper	0.03556				Bottom	
Bottom Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.01016	Solder Resist	3.5			0
Bottom Overlay	Overlay							

Рисунок 3.20 – Стек слоев на ПП блока ЦОС САН КА с МР

На рисунке 3.21 изображены модели поперечных сечений структуры МПП, использованные для моделирования исследуемой цепи в системе TALGAT. На рисунке 3.21а изображена модель поперечного сечения фрагмента трассы, проходящей на слое «top layer» (для слоя «bottom layer» модель идентична), где h_1 , ϵ_{r1} и h , ϵ_{r2} – толщины и относительные диэлектрические проницаемости слоев «top solder» и «dielectric 1» соответственно, w – ширина проводника и t – толщина проводника, d – расстояние до края диэлектрика. На рисунке 3.21б изображена

модель поперечного сечения фрагмента трасс, проходящих на слоях «signal 1» и «signal 2», где h_2 – толщина слоя «dielectric 3» или «dielectric 4», h – толщина слоя «dielectric 5», ϵ_{r1} – относительная диэлектрическая проницаемость слоев «dielectric 3» и «dielectric 4», ϵ_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость слоя «dielectric 5», w – ширина проводников и t – толщина проводников, s – расстояние между проводниками, d – расстояние до края диэлектрика. Для выполнения моделирования трасс «A/B_DAC_A51 (резервная) – A/B_DAC_A52 (резервируемая)», необходимо разбить ПП на фрагменты, где поперечное сечение регулярно, так как стеки разных участков ПП будут выглядеть по-разному.

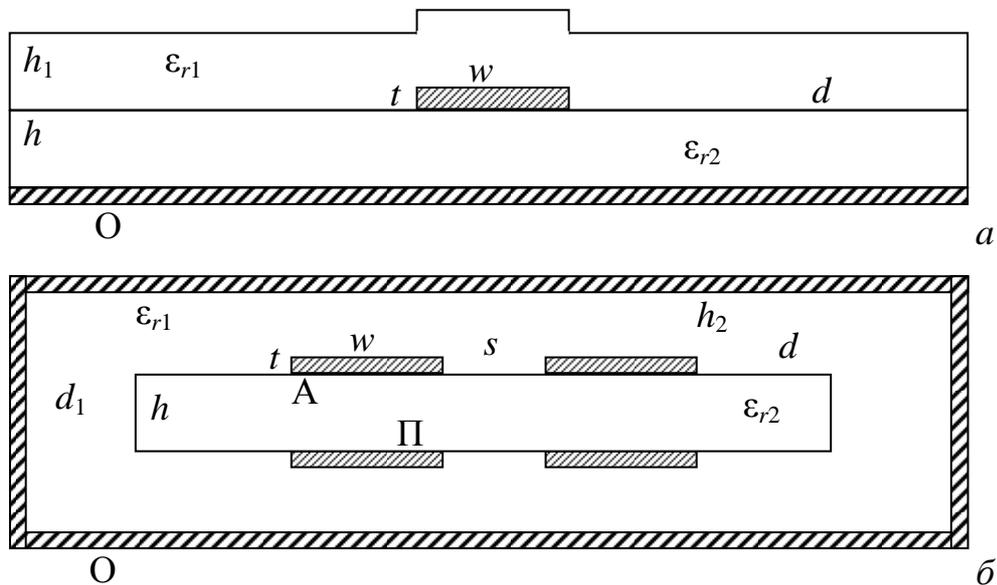


Рисунок 3.21 – Модели поперечных сечений структуры МПП для трасс на слоях «top layer» и «bottom layer» (а) и на слоях «signal 1» и «signal 2» (б)

Фрагменты резервируемой цепи (A/B_DAC_A52) изображены на рисунке 3.22. При построении моделей фрагментов ПП использованы неизменяемые параметры стека ПП, приведенные на рисунке 3.20. Модели фрагментов ПП с МР и их изменяемые геометрические параметры сведены в таблице 3.5. Для каждой из моделей в системе TALGAT вычислены матрицы индуктивностей и емкостей.

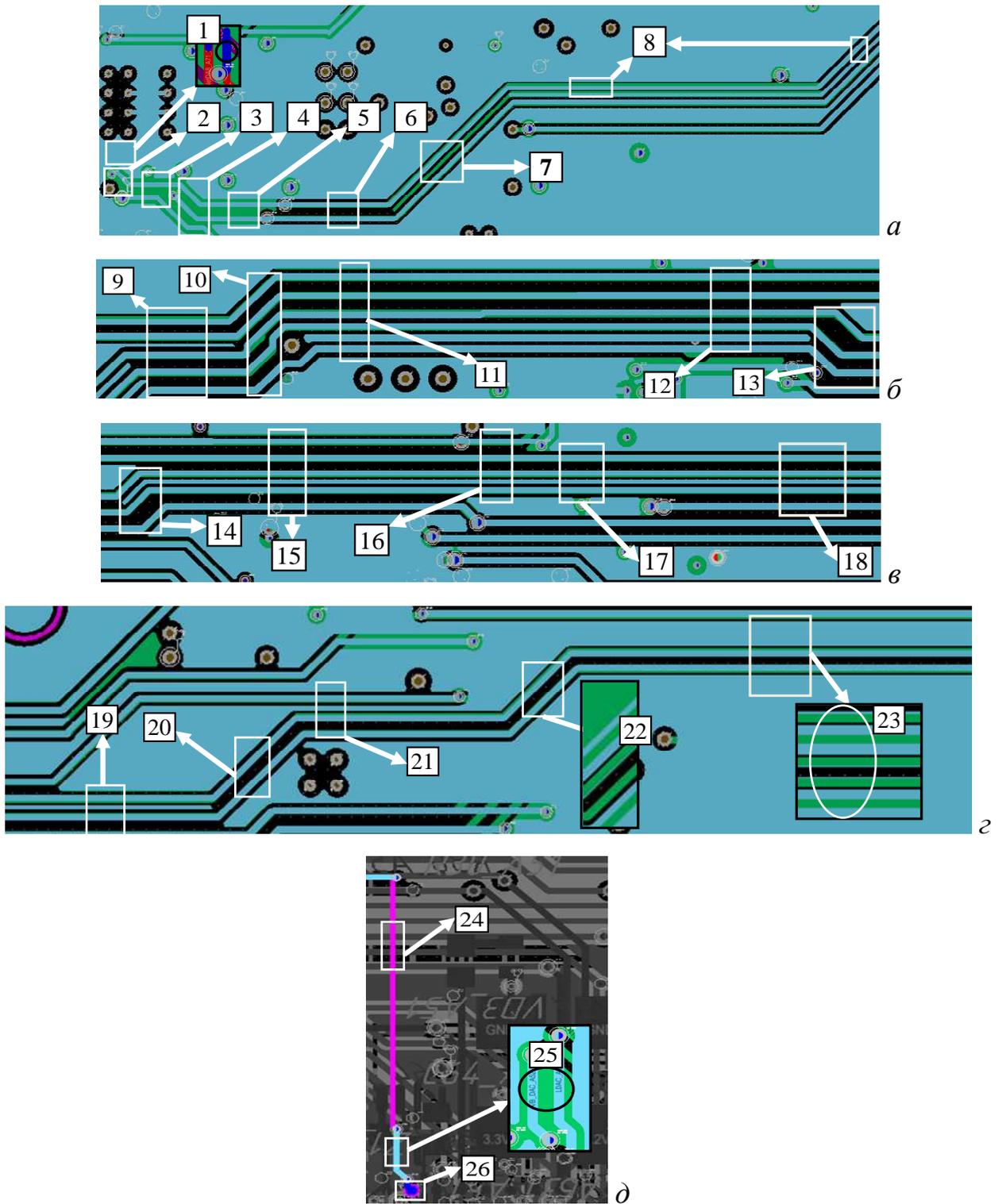
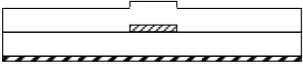
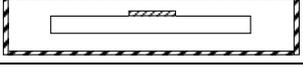
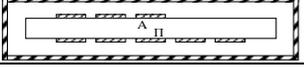
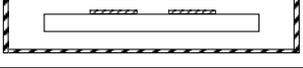
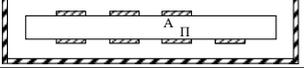
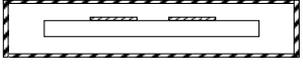
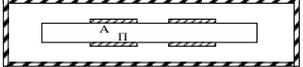
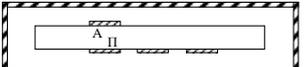
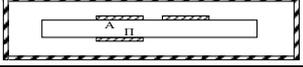
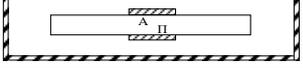
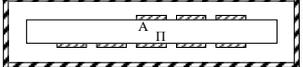
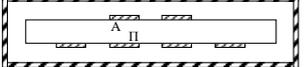
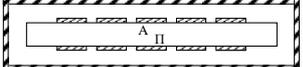
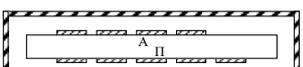
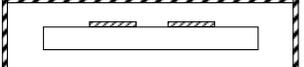
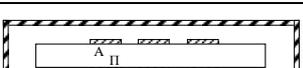
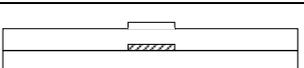


Рисунок 3.22 – Фрагменты ПП: а) 1 – 8; б) 9 – 13; в) 14 – 18; г) 19 – 23; д) 24 – 26

Таблица 3.5 – Модели фрагментов ПП с МР и их геометрические параметры

№	Геометрические параметры, мм			Модели фрагментов ПП	№	Геометрические параметры, мм			Модели фрагментов ПП
	l	w	s			l	w	s	
1	1	0,254	-		14	1,41	0,254	0,4	
2	1,36	0,264	-		15	14,5	0,254	0,4	
3	2,1	0,3	0,5		16	2,5	0,254	0,5	
4	2,28	0,254	0,424		17	5,7	0,254	0,5	
5	4,4	0,254	0,6		18	30,65	0,254	0,5	
6	5,85	0,254	0,6		19	6,25	0,254	0,5	
7	9,3	0,254	0,141		20	4,95	0,254	0,424	
8	32,1	0,254	-		21	9,5	0,254	0,4	
9	28,17	0,254	0,4		22	3,89	0,254	0,4	
10	2,21	0,254	0,4		23	20,4	0,254	0,5	
11	15,92	0,254	0,4		24	12,02	0,254	-	
12	5,18	0,254	0,4		25	2,65	0,254	-	
13	14,91	0,254	0,4		26	0,5	0,254	-	

На рисунке 3.23 представлена электрическая схема цепи, построенная в системе TALGAT, для моделирования распространения СКИ вдоль трасс ПП. Вычисленные первичные параметры фрагментов ПП (матрицы индуктивностей и емкостей) заносятся в соответствующий блок схемы цепи. На вход резервируемой цепи «A/B_DAC_A52» подается СКИ с ЭДС 5 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс.

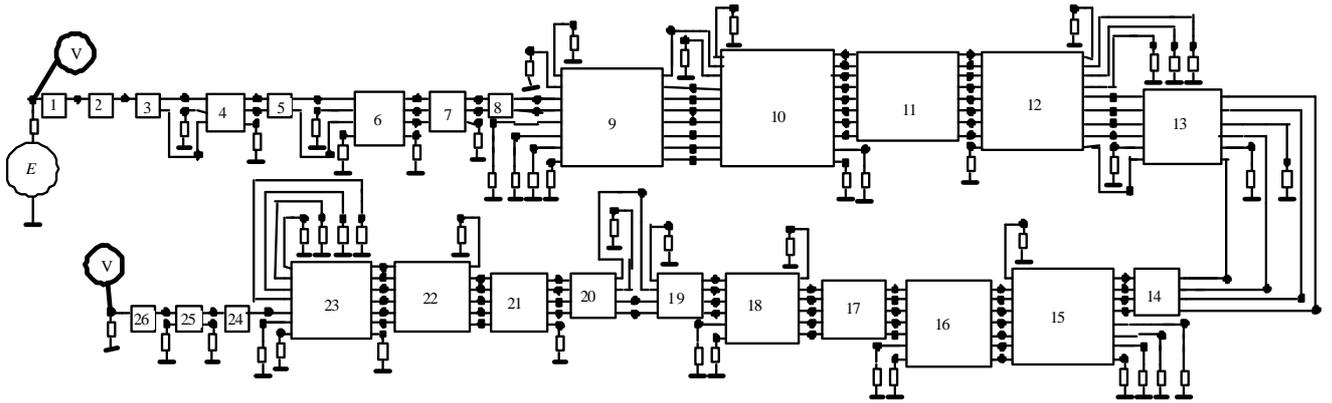


Рисунок 3.23 – Схема цепи для моделирования распространения СКИ на участках ПП с МР

На рисунке 3.24 представлены формы напряжения на входе и выходе цепи с МР при относительной диэлектрической проницаемости слоя между резервной и резервируемой цепями (ϵ_{r2}) равной 4,2.

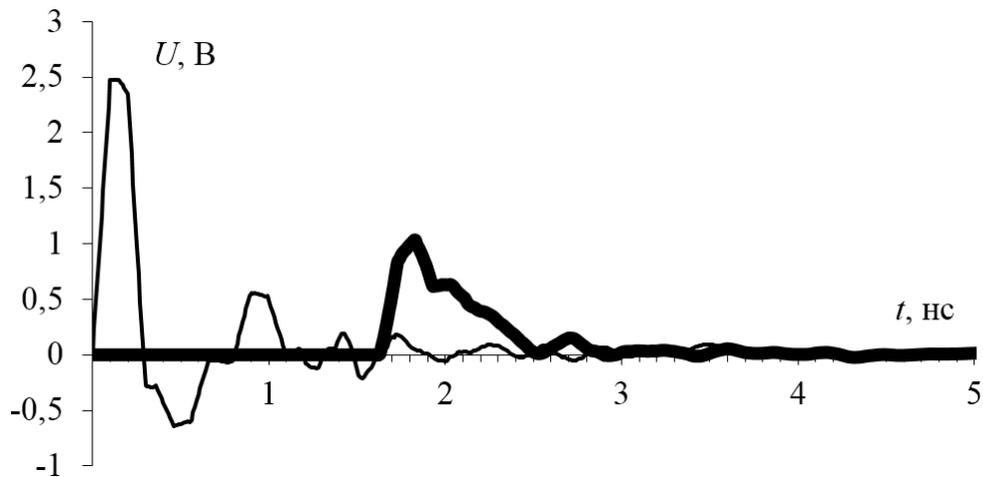


Рисунок 3.24 – Формы напряжения на ближнем (–) и дальнем (=) концах цепи с МР при $\epsilon_{r2}=4,2$

Затем, схема и параметры модели фрагментов линии ПП не изменялись, но изменялось значение ϵ_{r2} . Получались новые матрицы индуктивностей и емкостей, которые записывались в блоки схемы цепи.

На рисунке 3.25 представлены формы напряжения на входе и выходе цепи с МР при $\epsilon_{r2}=10$.

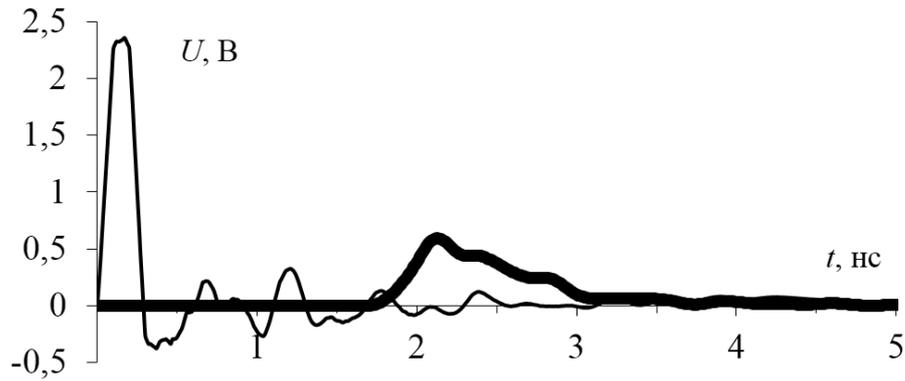


Рисунок 3.25 – Формы напряжения на ближнем (-) и дальнем (=) концах цепи с МР при $\epsilon_{r2}=10$

На рисунке 3.26 показаны вместе формы напряжения выходного сигнала без МР и с МР (при $\epsilon_{r2}=4,2$ и $\epsilon_{r2}=10$). Из графика видно, что амплитуда выходного сигнала помехи без МР ($U_{\text{вых}}=2,2$ В) в 2 раза больше сигнала с МР ($U_{\text{вых}}=1,05$ В), при $\epsilon_r=4,2$. Также из графика видно, что выходной сигнал при $\epsilon_{r2}=4,2$, примерно, в 1,5 раза больше чем при $\epsilon_{r2}=10$ ($U_{\text{вых}}=0,65$ В).

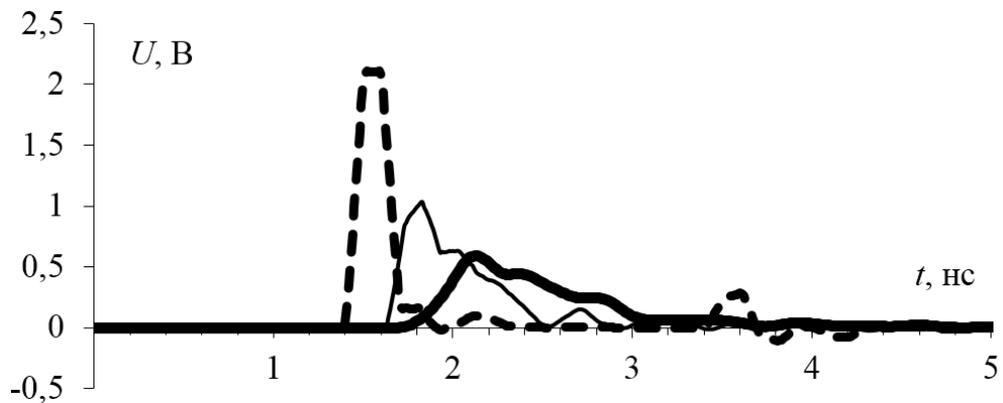


Рисунок 3.26 – Формы напряжения на дальнем конце цепи без МР (- -) и с МР при $\epsilon_{r2}=4,2$ (-) и $\epsilon_{r2}=10$ (=)

3.3.1.3 Выводы

Рассмотрены две реализации МР в цепях ПП блока ЦОС САН КА. Коэффициент затухания схемы без МР незначителен. Затухание вызвано электромагнитной связью с параллельными трассами и граничными условиями на их концах. Реализация МР только за счет изменения топологии ПП увеличила

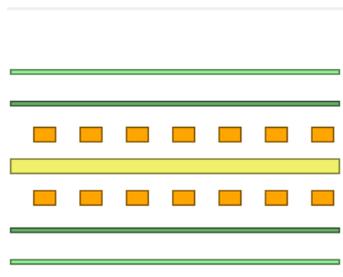
коэффициент ослабления (к половине ЭДС) до значения 2,4, а с изменением относительной диэлектрической проницаемости слоя «Dielectric 5» с 4,2 до 10 – до значения 3,8.

3.3.2 Источник питания

В данном разделе [92] аналогично рассмотрено распространение СКИ вдоль трасс резервируемых цепей ПП ИП КА.

3.3.2.1 Моделирование цепей без модального резервирования

В качестве исследуемой структуры выбрана ПП ИП для САН КА (рисунок 3.27). В качестве исследуемой цепи выбрана «-27V». Она проходит по слоям «Top layer» и «Bottom layer».



Layer Name	Type	Material	Thickness (mm)	Dielectric Material	Dielectric Constant	Pullback (mm)
Top Overlay	Overlay					
Top Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.01016	Solder Resist	3.5	
Top Layer	Signal	Copper	0.035			
Dielectric1	Dielectric	Core	0.254	FR-4	4.2	
Bottom Layer	Signal	Copper	0.035			
Bottom Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.01016	Solder Resist	3.5	
Bottom Overlay	Overlay					

Рисунок 3.27 – Стек слоев ПП ИП без МР

На рисунке 3.28 показано, как будут выглядеть модели фрагментов исследуемой цепи при учете соседних межсоединений. Изображена модель поперечного сечения фрагмента трассы, проходящей на слое «Top layer» и «Bottom layer», где h_1 , ϵ_{r1} и h , ϵ_{r2} – толщины и относительные диэлектрические проницаемости слоев «Top solder», «Bottom solder» и «Dielectric 1» соответственно, w – ширина проводников, t – толщина проводников, s – расстояние между проводниками, d – расстояние до края диэлектрика.

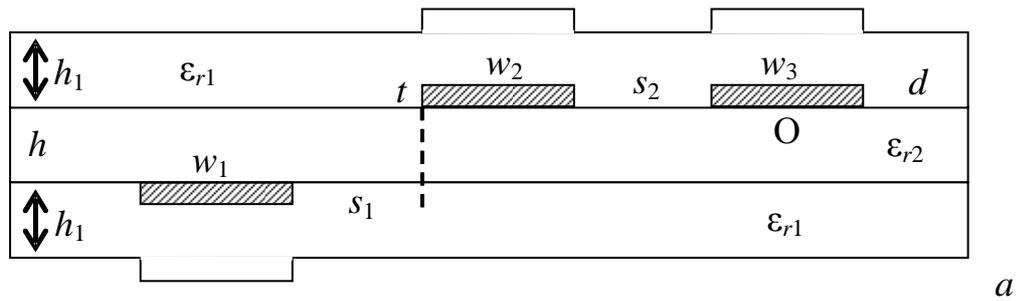


Рисунок 3.28 – Модель поперечного сечения структуры МПП ИП

При построении моделей фрагментов ПП (рисунок 3.29) использованы неизменяемые параметры стека ПП, приведенные на рисунке 3.27. Модели фрагментов и их изменяемые геометрические параметры сведены в таблицу 3.6. Для каждой из моделей в системе TALGAT вычислена матрица индуктивностей и емкостей.

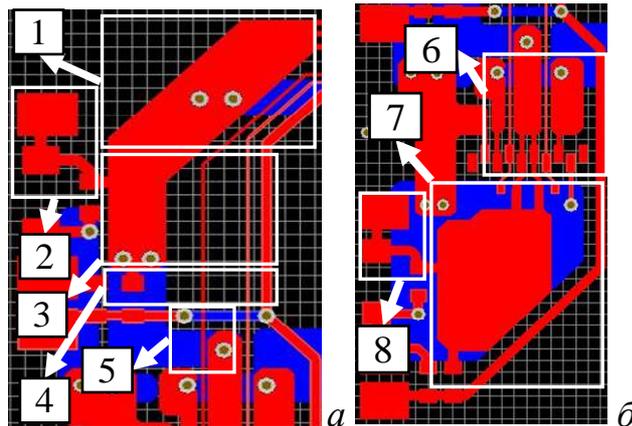


Рисунок 3.29 – Фрагменты ПП ИП с цепью $-27V$: а) 1 – 5, б) 6 – 8

На рисунке 3.30 представлена электрическая схема цепи, построенная в системе TALGAT, для моделирования распространения импульсного сигнала вдоль трасс ПП. Вычисленные первичные параметры фрагментов ПП (матрицы индуктивностей и емкостей) записываются в соответствующий блок схемы цепи. На вход цепи « $-27V$ » подается СКИ с ЭДС 5 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс. Временной отклик приведен на рисунке 3.31. Выходное напряжение (1,8 В) по отношению к половине ЭДС (2,5 В) уменьшилось незначительно.

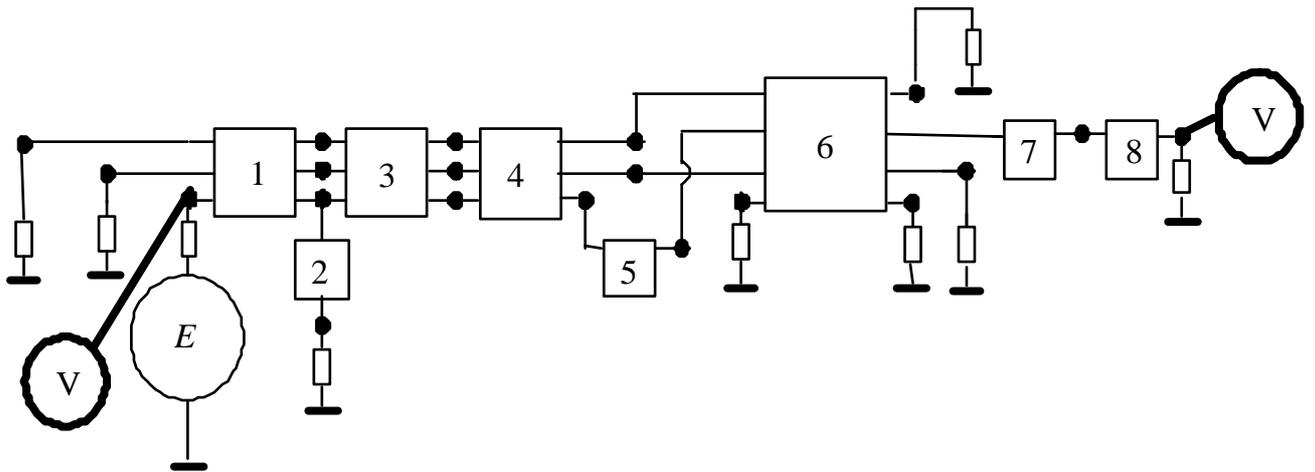


Рисунок 3.30 – Принципиальная схема для моделирования распространения импульсного сигнала на участках ПП ИП

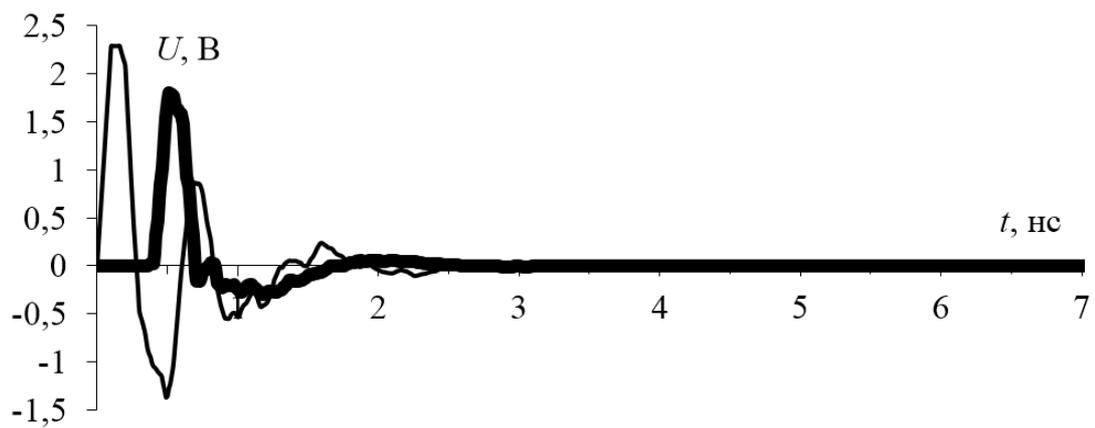
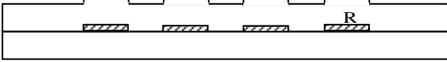
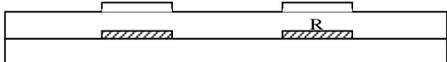
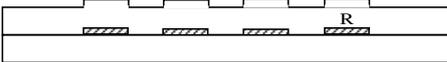
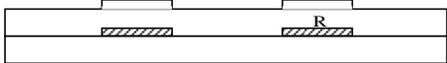
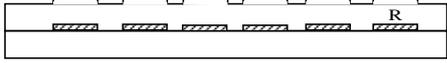
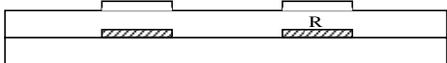
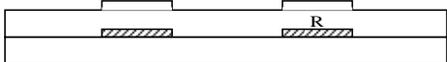


Рисунок 3.31 – Формы напряжения на ближнем (–) и дальнем (=) концах цепи без МР

Таблица 3.6 – Модели фрагментов для ПП и их геометрические параметры

№	Геометрические параметры, мм												Модели фрагментов ПП
	l	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	
1	15,66,19	0,3	0,3	1,12	–	–	0,89	0,53	0,71	–	–		
2	13,2	1	1,12	–	–	–	7,75	–	–	–	–		
3	8,2	6,20	0,3	0,3	1,12	–	–	2,83	3,5	0,88	–	–	
4	5,8	6,20	0,3	0,3	1,12	–	–	2,83	3,5	0,88	–	–	
5	9,5	3,25	1	–	–	–	–	1	–	–	–	–	
6	14,81,25	0,3	2,76	0,3	3,25	1	0,35	0,35	0,35	0,35	1,25		
7	12,23,25	1	–	–	–	–	5,25	–	–	–	–		
8	13,7	1	1	–	–	–	–	12,7	–	–	–	–	

3.3.2.2 Моделирование цепей с модальным резервированием

В качестве исследуемой структуры выбрана та же ПП, но с МР. В рассматриваемой МПП (таблица 3.7) МР выполнено на сигнальных слоях (Signal 1 и Signal 2). Полигоны, расположенные на слоях «Top Layer» и «Bottom Layer», экранируют слои, на которых осуществляется МР.

Таблица 3.7 – Стек слоев для ПП ИП с МР

Название слоя	Материал	Толщина, мм	Диэлектрическая постоянная
Top Solder	Паяльная маска	0,01016 (h_1)	3,5 (ϵ_{r1})
Top Layer	Медь	0,036 (t)	
Dielectric 1	Ядро	0,254 (h_2)	4,2 (ϵ_{r2})
Signal 1	Медь	0,036 (t)	
Dielectric 2	Препрег	0,127 (h)	4,2 (ϵ_r)
Signal 2	Медь	0,036 (t)	
Dielectric 3	Ядро	0,254 (h_2)	4,2 (ϵ_{r2})
Bottom Layer	Медь	0,036 (t)	
Bottom Solder	Паяльная маска	0,01016 (h_1)	3,5 (ϵ_{r1})

Модели поперечных сечений структуры МПП, использованные для моделирования исследуемой цепи в системе TALGAT аналогичны моделям рассмотренным в разделе 3.3.1.2. На рисунке 3.21а изображена модель поперечного сечения фрагмента трассы, проходящей на слое «Top layer» (для слоя «Bottom layer» модель идентична), где h_1 , ϵ_{r1} и h , ϵ_{r2} – толщины и относительные диэлектрические проницаемости слоев «Top solder» и «Dielectric 1» соответственно, w – ширина проводника, t – толщина проводника, d – расстояние до края диэлектрика. На рисунке 3.21б изображена модель поперечного сечения фрагмента трасс, проходящих на слоях «Signal 1» и «Signal 2», где h_2 – толщина слоя «Dielectric 1» или «Dielectric 3», h – толщина слоя «Dielectric 2», ϵ_{r1} – относительная диэлектрическая проницаемость слоев «Dielectric 1» или «Dielectric 3», ϵ_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость слоя «Dielectric 2», w – ширина проводников, t – толщина проводников, s – расстояние между проводниками, d – расстояние до края диэлектрика. Для моделирования резервной и резервируемой трасс, необходимо разбить ПП на фрагменты, где поперечное сечение регулярно.

Фрагменты резервируемой цепи ($-27V$) изображены на рисунке 3.32. При построении моделей фрагментов ПП использованы неизменяемые параметры

стека ПП из таблицы 3.7. Модели фрагментов ПП с МР и их изменяемые геометрические параметры сведены в таблице 3.8.

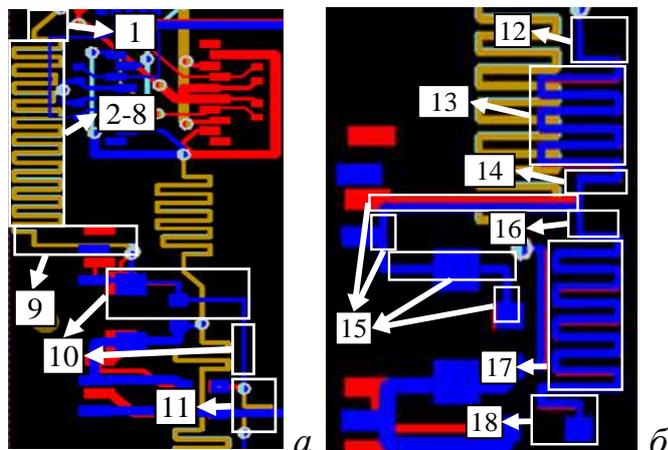


Рисунок 3.32 – Фрагменты ПП ИП: а) 1 – 11; б) 12 – 18

Таблица 3.8 – Модели фрагментов ПП с МР и их геометрические параметры

№	Геометрические параметры, мм			Модели фрагментов ПП	№	Геометрические параметры, мм			Модели фрагментов ПП
	l	w	s			l	w	s	
1	18,7	1,25	–		13	12,5	1,25	1,25	
2-8	12,5	1,25	1,25		14	15	1,25	–	
9	29	1,25	–		15	86,2	1,25	–	
10	7	1,25	–		16	15	1,25	–	
11	7,5	1,25	1,25		17	12,5	1,25	1,25	
12	20	1,25	–		18	15	1,25	–	

На рисунке 3.33 представлена электрическая схема цепи, построенная в системе TALGAT, для моделирования распространения СКИ вдоль трасс ПП. Вычисленные первичные параметры фрагментов ПП (матрицы индуктивностей и емкостей), заносятся в соответствующий блок схемы цепи. На вход

резервируемой цепи «A/B_DAC_A52» подается СКИ с ЭДС 5 В с длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс.

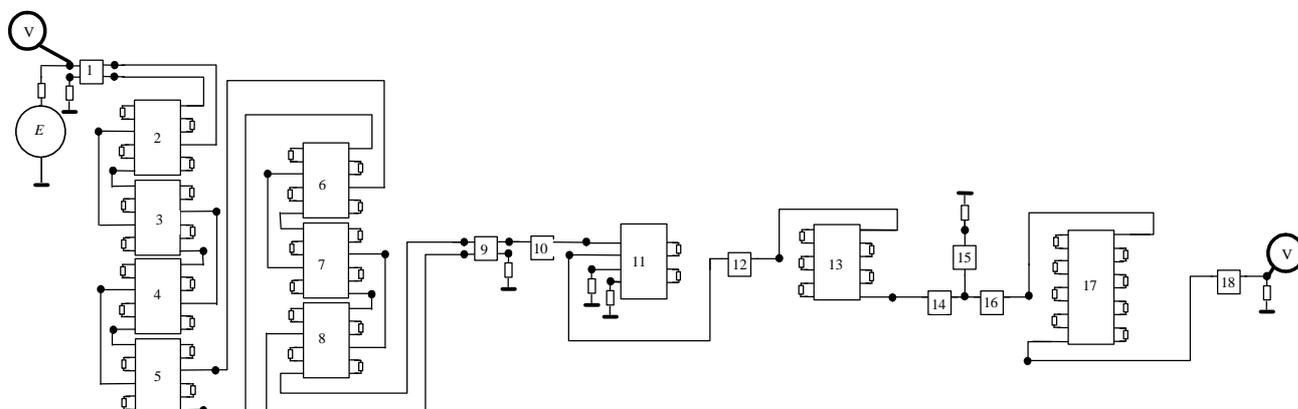


Рисунок 3.33 – Схема цепи для моделирования распространения СКИ на участках ПП

На рисунке 3.34 представлены формы напряжения на входе и выходе цепи с МР при $\epsilon_{r2}=4,2$. Амплитуда импульсной помехи ослабляется в 1,5 раза ($U_{\text{ВЫХ}}=1,6$ В).

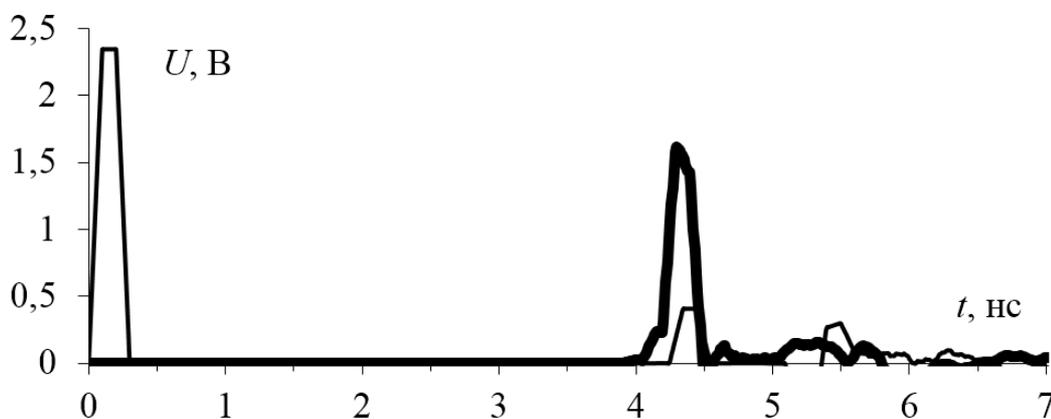


Рисунок 3.34 – Формы напряжения на ближнем (–) и дальнем (=) концах цепи с МР при $\epsilon_{r2}=4,2$

Далее бралось $\epsilon_{r2}=10$. Полученные новые матрицы индуктивностей и емкостей записывались в блоки схемы цепи (рисунок 3.33). На рисунке 3.35 представлены формы напряжения на входе и выходе цепи с МР при $\epsilon_{r2}=10$. Амплитуда СКИ ослабилась в 2,3 раза ($U_{\text{ВЫХ}}=1,1$ В).

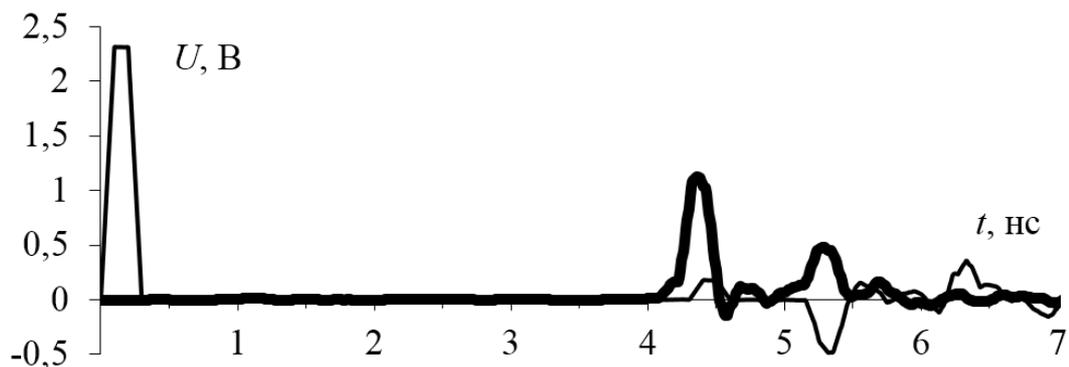


Рисунок 3.35 – Формы напряжения
на ближнем (–) и дальнем (=) концах цепи с МР при $\epsilon_{r2}=10$

Сравнение выходных сигналов показано на рисунке 3.36. Видно, что амплитуда выходного сигнала без МР ($U_{\text{вых}}=1,8$ В) несколько больше, чем для сигнала с МР с $\epsilon_{r2}=4,2$ ($U_{\text{вых}}=1,6$ В). Также видно, что выходной сигнал для $\epsilon_{r2}=4,2$ 1,5 раза больше, чем сигнал с $\epsilon_{r2}=10$ ($U_{\text{вых}}=1,1$ В).

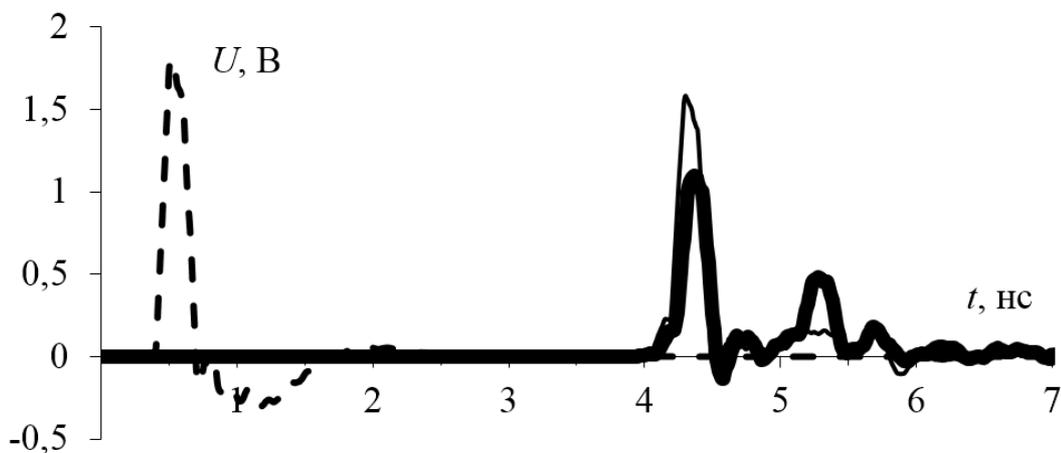


Рисунок 3.36 – Формы напряжений
на дальнем конце линии без МР (- -) и с МР при $\epsilon_{r2}=4,2$ (–) и $\epsilon_{r2}=10$ (=)

3.3.2.3 Выводы

Рассмотрены две реализации МР в цепях ПП ИП САН КА. Коэффициент ослабления схемы без МР составил 1,4 раза. Затухание обусловлено электромагнитной связью между параллельными трассами. Реализация МР только

путем изменения топологии ПП увеличивает коэффициент ослабления до 1,6 раза, а МР с изменением диэлектрического заполнения слоя «Dielectric 2» до 2,3 раза.

3.4 Экспериментальные исследования модального резервирования

3.4.1 Обоснование конструкции макета

В данном разделе представлены структурная схема испытательной установки макета МПП, реализующего МФ, поперечные сечения МПП макета для цепей с МР, разработана и обоснована конструкция макета.

Макеты ПП должны наглядно демонстрировать возможность применения МР для подавления помехового сигнала. Целесообразно использовать применяемые на практике технологии конструирования ПП. Такой подход имеет ряд преимуществ: заводское изготовление обеспечивает стабильные геометрические и электрофизические параметры структур ПП; применение в макетах распространенных специализированных материалов, вместо специально спроектированной тестовой структуры, повышает демонстрационные возможности макетов, доказывая возможность реализации и использования модальных явлений в цепях с резервированием. Так как при МР применяются как торцевая, так и лицевая связи, рационально изготовление макета с такими связями между проводниками.

Простейшим примером для демонстрации модального разложения в цепях с МР представляется обычная микрополосковая связанная линия, где резервируемая и резервная цепи имеют один опорный проводник, а резервируемые и резервные проводники одноименных цепей прокладываются парами, параллельно друг другу, на одном слое, с минимальным технологически допустимым зазором между ними (торцевая связь).

Поперечное сечение макета, показывающее достижимость технического результата в цепях с резервированием, аналогично приведенному на рисунке 2.1а, а геометрические параметры сведены в таблице 3.9. Вычисленные параметры

собраны в таблице 3.10. Для рассмотренной структуры связанных линий абсолютное значение разности погонных задержек мод $|\Delta\tau|$ находится в диапазоне 0 – 2,4 нс/м. Это означает, что для ПП длиной $l=1$ м получится разложить на импульсы меньших амплитуд импульсы длительностью до 2,4 нс ($|\Delta\tau| \times l$). Так как для макета практически использовать геометрические размеры реальных ПП, длину макета предпочтительно выбирать в пределах 0,4 м. При таких размерах длины макета разложение возможно при длительности импульсов до 1 нс.

Таблица 3.9 – Геометрические параметры проводников структуры связанных линий

Геометрические параметры, мкм				
w	t	h	d	s
300	65	510	900	100

Таблица 3.10 – Вычисленные матрицы **L**, **C**, **Z**, погонные задержки мод и абсолютные значения их разностей для связанных МПЛ, при изменении ϵ_r

ϵ_r	Матрицы						Погонные задержки и их разность, нс/м		
	L , нГн/м		C , пФ/м		Z , Ом		τ_1	τ_2	$ \Delta\tau $
1	449,0	235,8	34,4	-18,0	134	70	3,333	3,333	0,000
	235,8	449,0	-18,0	34,4	70	134			
3	449,0	235,8	62,8	-27,9	94	46	4,893	4,397	0,496
	235,8	449,0	-27,9	62,8	46	94			
5	449,0	235,8	90,9	-37,8	77	36	6,032	5,236	0,795
	235,8	449,0	-37,8	90,9	36	77			
7	449,0	235,8	118,8	-47,6	67	31	6,982	5,957	1,025
	235,8	449,0	-47,6	118,8	31	67			
9	449,0	235,8	146,8	-57,5	60	27	7,816	6,599	1,217
	235,8	449,0	-57,5	146,8	27	60			
11	449,0	235,8	174,7	-67,4	55	25	8,569	7,184	1,385
	235,8	449,0	-67,4	174,7	25	55			
13	449,0	235,8	202,5	-77,3	51	23	9,261	7,724	1,537
	235,8	449,0	-77,3	202,5	23	51			
15	449,0	235,8	230,4	-87,2	47	21	9,903	8,228	1,675
	235,8	449,0	-87,2	230,4	21	47			
17	449,0	235,8	258,3	-97,1	45	20	10,507	8,704	1,803
	235,8	449,0	-97,1	258,3	20	45			
19	449,0	235,8	286,2	-107,0	42	19	11,077	9,155	1,922
	235,8	449,0	-107,0	286,2	19	42			
21	449,0	235,8	314,0	-116,9	40	18	11,620	9,584	2,036
	235,8	449,0	-116,9	314,0	18	40			
23	449,0	235,8	341,9	-126,8	39	17	12,138	9,995	2,143
	235,8	449,0	-126,8	341,9	17	39			
25	449,0	235,8	369,8	-136,6	37	17	12,635	10,390	2,245
	235,8	449,0	-136,6	369,8	17	37			
27	449,0	235,8	397,6	-146,5	36	16	13,113	10,770	2,343
	235,8	449,0	-146,5	397,6	16	36			
29	449,0	235,8	425,5	-156,4	35	16	13,574	11,138	2,436
	235,8	449,0	-156,4	425,45	16	35			

Поперечное сечение структуры МПП приведено на рисунке 3.37 (лицевая связь), а геометрические параметры сведены в таблице 3.11. Вычисленные параметры представлены в таблице 3.12. Из нее следует, что для рассмотренной структуры МПП абсолютное значение разности погонных задержек мод

находится в диапазоне 0,7 – 6,5 нс/м. Из этого следует, что для ПП длиной $l=1$ м разложение импульсов возможно при длительности 0,7 – 6,5 нс, а длиной 0,4 м – примерно 0,3 – 2,6 нс.

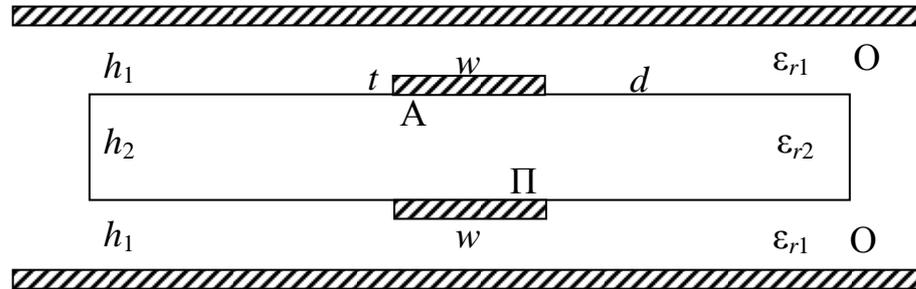


Рисунок 3.37 – Поперечное сечение структуры МПП

Таблица 3.11 – Геометрические параметры поперечного сечения структуры МПП

Геометрические параметры, мкм						
w	t	h_2	h_1	d	ε_{r1}	ε_{r2}
300	65	510	200	900	5	см. таблицу 3.12

Таблица 3.12 – Вычисленные матрицы **L**, **C**, **Z**, погонные задержки мод и абсолютные значения их разностей для структуры МПП, при изменении ϵ_{r2}

ϵ_{r2}	Матрицы			Погонные задержки и их разность, нс/м		
	L , нГн/м	C , пФ/м	Z , Ом	τ_1	τ_2	$ \Delta\tau $
1	206,1 96,1 96,1 206,1	210,6 –35,5 –35,5 210,6	31 10 10 31	7,273	5,202	2,071
3	206,1 96,1 96,1 206,1	279,6 –99,8 –99,8 279,6	29 12 12 29	7,370	6,459	0,910
5	206,1 96,1 96,1 206,1	345,3 –161,2 –161,2 345,3	27 13 13 27	7,461	7,461	0,000
7	206,1 96,1 96,1 206,1	409,5 –221,3 –221,3 409,5	26 13 13 26	8,329	7,541	0,787
9	206,1 96,1 96,1 206,1	472,8 –280,7 –280,7 472,8	26 14 14 26	9,104	7,618	1,485
11	206,1 96,1 96,1 206,1	535,7 –339,9 –339,9 535,7	25 14 14 25	9,813	7,691	2,121
13	206,1 96,1 96,1 206,1	598,1 –398,8 –398,8 598,1	25 14 14 25	10,471	7,760	2,710
15	206,1 96,1 96,1 206,1	660,3 –457,6 –457,6 660,3	24 14 14 24	11,088	7,826	3,261
17	206,1 96,1 96,1 206,1	722,3 –516,3 –516,3 722,3	24 14 14 24	11,671	7,889	3,782
19	206,1 96,1 96,1 206,1	784,1 –574,9 –574,9 784,1	23 14 14 23	12,225	7,949	4,276
21	206,1 96,1 96,1 206,1	845,7 –633,6 –633,6 845,7	23 14 14 23	12,755	8,007	4,748
23	206,1 96,1 96,1 206,1	907,3 –692,2 –692,2 907,2	23 15 15 23	13,263	8,062	5,201
25	206,1 96,1 96,1 206,1	968,7 –750,8 –750,8 968,7	23 15 15 23	13,752	8,116	5,635
27	206,1 96,1 96,1 206,1	1030,1 –809,4 –809,4 1030,1	22 15 15 22	14,223	8,167	6,055
29	206,1 96,1 96,1 206,1	1091,4 –867,9 –867,9 1091,4	22 15 15 22	14,680	8,217	6,462

Структурная схема испытательной установки показана на рисунке 3.38. В качестве компонентов макета для МР, для структурной схемы, целесообразно использовать уже существующие и доступные на рынке приборы, поскольку

самостоятельная разработка потребует значительных материальных вложений и для макетирования является избыточной. Как генератор импульсов, приемник и блок обработки можно использовать осциллограф С9-11, имеющий полосу пропускания 0–26 ГГц и тракт с волновым сопротивлением 50 Ом.



Рисунок 3.38 – Структурная схема испытательной установки

Таким образом установка для испытаний макета для МР может включать следующие компоненты:

- 1) осциллограф вычислительный комбинированный С9-11 (генератор импульсов, приемник);
- 2) ПП длиной 0,4 м (исследуемая связанная линия).

Для изготовления макета выбрана структура МПП (самый первый вариант макета подразумевал ДПП), так как абсолютное значение разности погонных задержек мод $|\Delta\tau|$ в ней может достигать 6,5 нс/м, что при $l=0,4$ м более наглядно продемонстрирует эффект модального разложения импульсного сигнала.

3.4.2 Оптимизация параметров макета

В данном разделе представлены результаты оптимизации, с помощью генетического алгоритма (ГА) [93], стека макета МПП под волновой тракт 50 Ом, реализующего МР с учетом техпроцессов производства МПП и рассмотренных параметров материалов.

Электрофизические параметры возможных диэлектрических материалов для выбора слоя между проводниками приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Параметры материалов

Тип материала	Производитель Материал	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta$	Источник
		На частоте	10 ГГц	
Фторопласт с керамическим наполнителем, армированный стеклотканью (PTFE/Ceramic/Woven Glass)	Taconic CER-10	10±0,50	35*10 ⁻⁴	http://www.rcmgroup.ru/svch-block/svch-materialy/kharakteristiki-taconic.html
	Arlon AD1000	10,20±0,35	23*10 ⁻⁴	http://www.arlon-med.com/AD-Series:-Low-Loss-Dielectric-for-Commercial-RF-Applications/
	Rogers RO3210	10,20±0,50	27*10 ⁻⁴	https://www.rogerscorp.com/acs/products/45/RO3203-RO3206-and-RO3210-Laminates.aspx
Композиционный материал (Thermoset/Ceramic)	Rogers TMM 10	9,20±0,23	22*10 ⁻⁴	https://www.rogerscorp.com/acs/products/49/TMM-10-Laminates.aspx
	Rogers TMM 10i	9,80±0,245	20*10 ⁻⁴	
Полифениленоксид (Polyphenylene Oxid)	Молдавизолит ФЛАН 16	16±0,8	50*10 ⁻⁴	http://moldavizolit.com/rus/1_mat_for_pcb/svch/flan.html
Фторопласт с керамическим наполнителем (PTFE/Ceramic)	Rogers RO3010	10,2±0,30	22*10 ⁻⁴	https://www.rogerscorp.com/acs/products/39/RO3006-and-RO3010-Laminates.aspx
	Rogers RT/duroid6010LM	10,2±0,250	23*10 ⁻⁴	https://www.rogerscorp.com/acs/products/36/RT-duroid-6006-6010-Laminates.aspx
Керамика	ОАО «ЦКБ РМ» МТ-15	15	5*10 ⁻⁴	http://ckbrm.ru/index.php?products=1
	ОАО «ЦКБ РМ» МТ-20	20	2*10 ⁻⁴	
	ОАО «ЦКБ РМ» БА-35	35	3*10 ⁻⁴	
	ОАО «ЦКБ РМ» МТ-60	60	4*10 ⁻⁴	
	ОАО «ЦКБ РМ» МТ-90	70	3*10 ⁻⁴	
	ОАО «ЦКБ РМ» ФР-10	9,7–10	4*10 ⁻⁴	

В качестве диэлектрика выбран Rogers RO3010, обладающий относительно малой толщиной слоя (130 мкм) и высоким значением относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r .

Оптимизация производилась с помощью простого ГА, встроенного в систему TALGAT. ГА является эволюционным алгоритмом, основная идея которого – комбинирование (скрещивание). Алгоритм делится на три основных этапа: скрещивание (формирование популяции), селекция (отбор) и формирование нового поколения. Шаги повторяются до тех пор, пока результат не станет приемлем или количество поколений (циклов) не достигнет заданного значения. В общем случае использование ГА позволяет исключить задачу полного перебора.

Параметры ГА выбраны следующими: число особей – 30; количество поколений – 30; коэффициент мутации – 0,5; коэффициент кроссовера – 0,5. Критерием оптимизации являлась минимизация отклонения от 50 Ом среднегеометрического значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод $(Z_o Z_e)^{0,5}$, вычисленных из элементов матрицы \mathbf{Z} как $Z_o = Z_{11} - Z_{21}$, $Z_e = Z_{11} + Z_{21}$. Граничные условия при вычислении временного отклика выбирались из условия

$$R = (Z_o Z_e)^{0,5}. \quad (3.1)$$

Поперечное сечение совпадает с представленным на рисунке 3.37, а принципиальная схема – на рисунке 2.1б (раздел 2.2.1).

Без учета реальных параметров (таблица 3.14), которые используются для изготовления ПП, можно получить коэффициент ослабления (длина линии 40 см) около 5 раз (рисунок 3.39) и диагональные значения матрицы \mathbf{Z} равными 50 Ом. Однако при этом значение $(Z_o Z_e)^{0,5}$ относительно мало и не достигает 50 Ом. Зависимости $(Z_o Z_e)^{0,5}$ от электрофизических и геометрических параметров приведены на рисунках 3.40 – 3.43.

Таблица 3.14 – Параметры поперечного сечения макета с МР МПП без учета реальных значений

Параметры							Z , Ом	
w , МКМ	t , МКМ	h_2 , МКМ	h_1 , МКМ	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	$ \Delta\tau $, нс/м	50	49
300	65	10	630	5	25	8,7	49	50

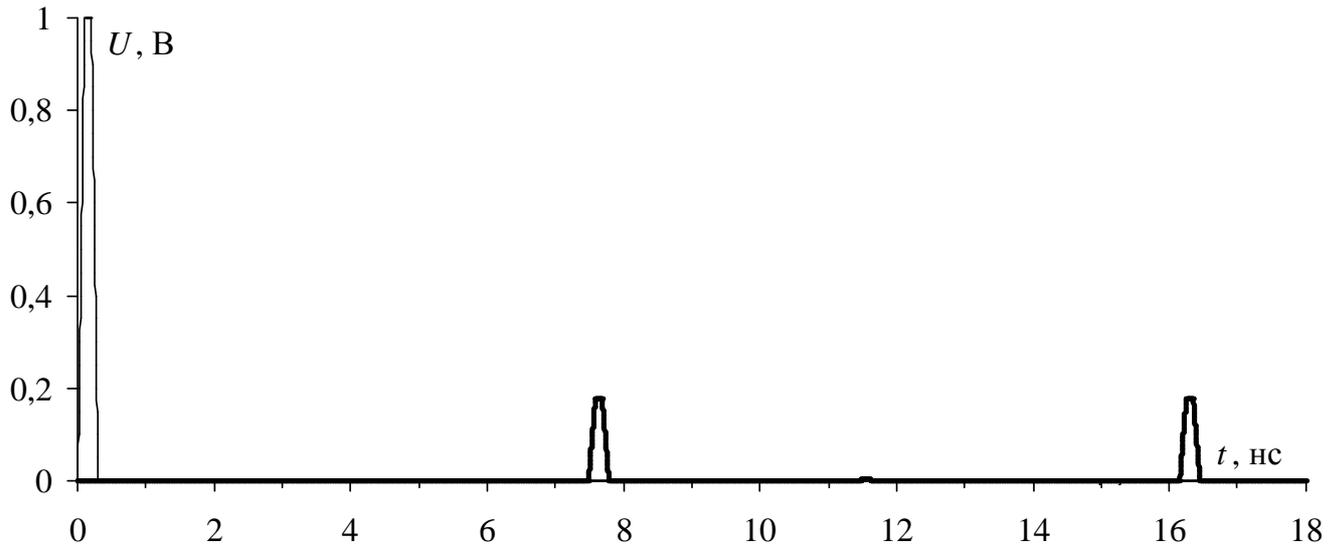


Рисунок 3.39 – Формы напряжения в начале (–) и конце (=) активной линии МПП

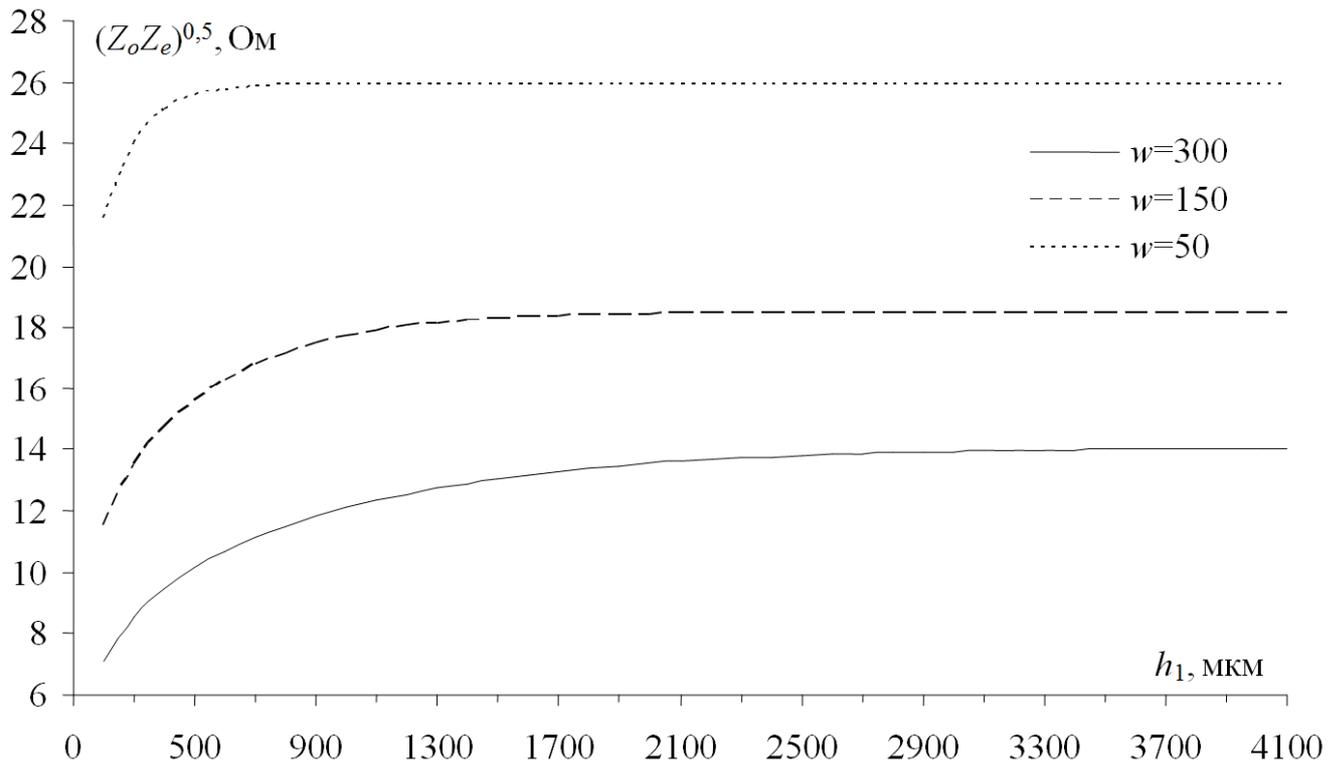


Рисунок 3.40 – Зависимости $(Z_e Z_o)^{0.5}$ от h_1 при разных w , мкм

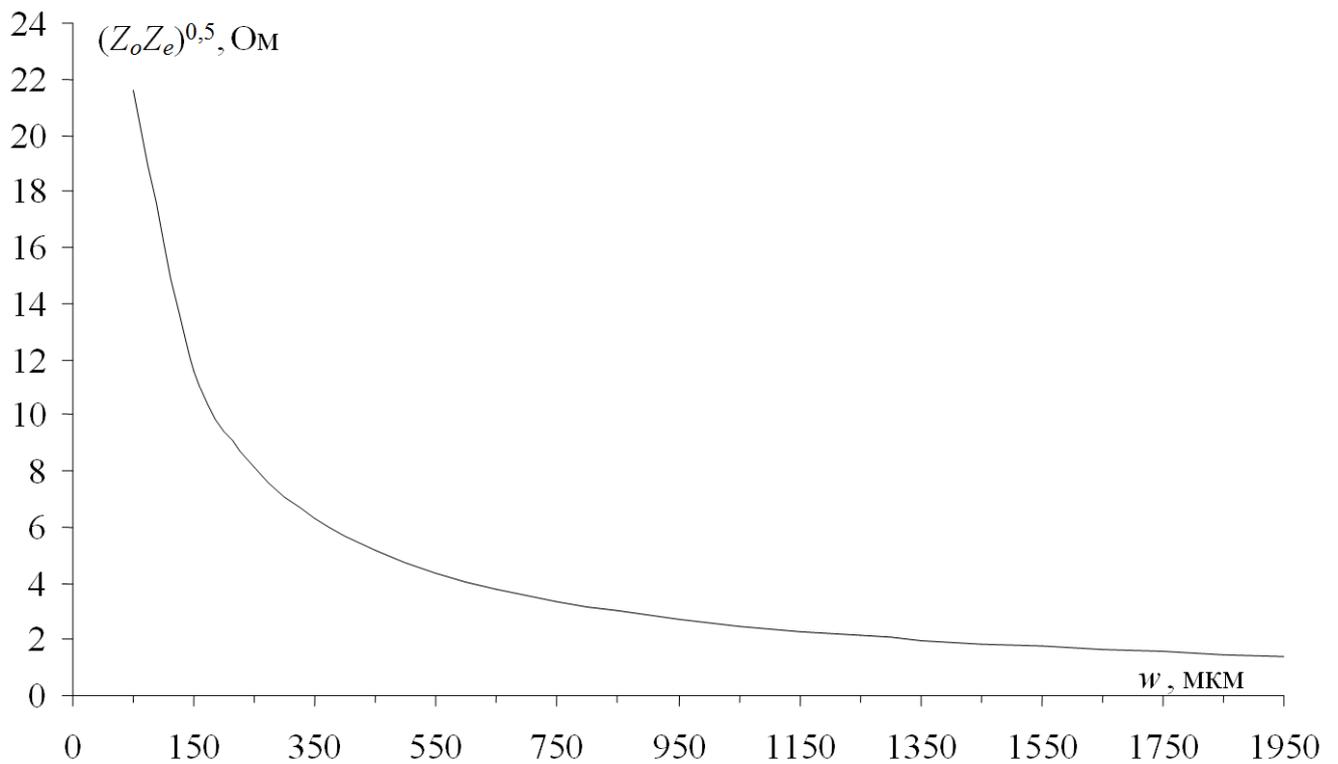
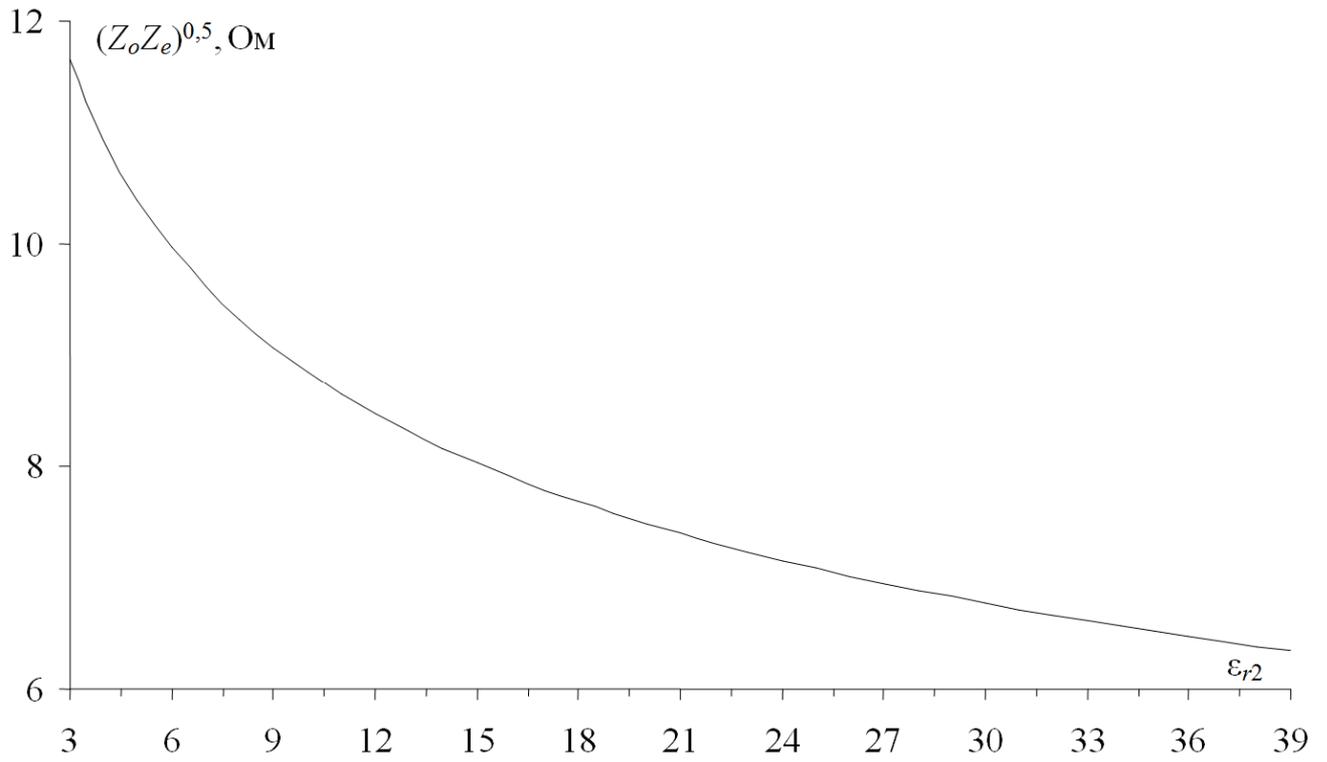
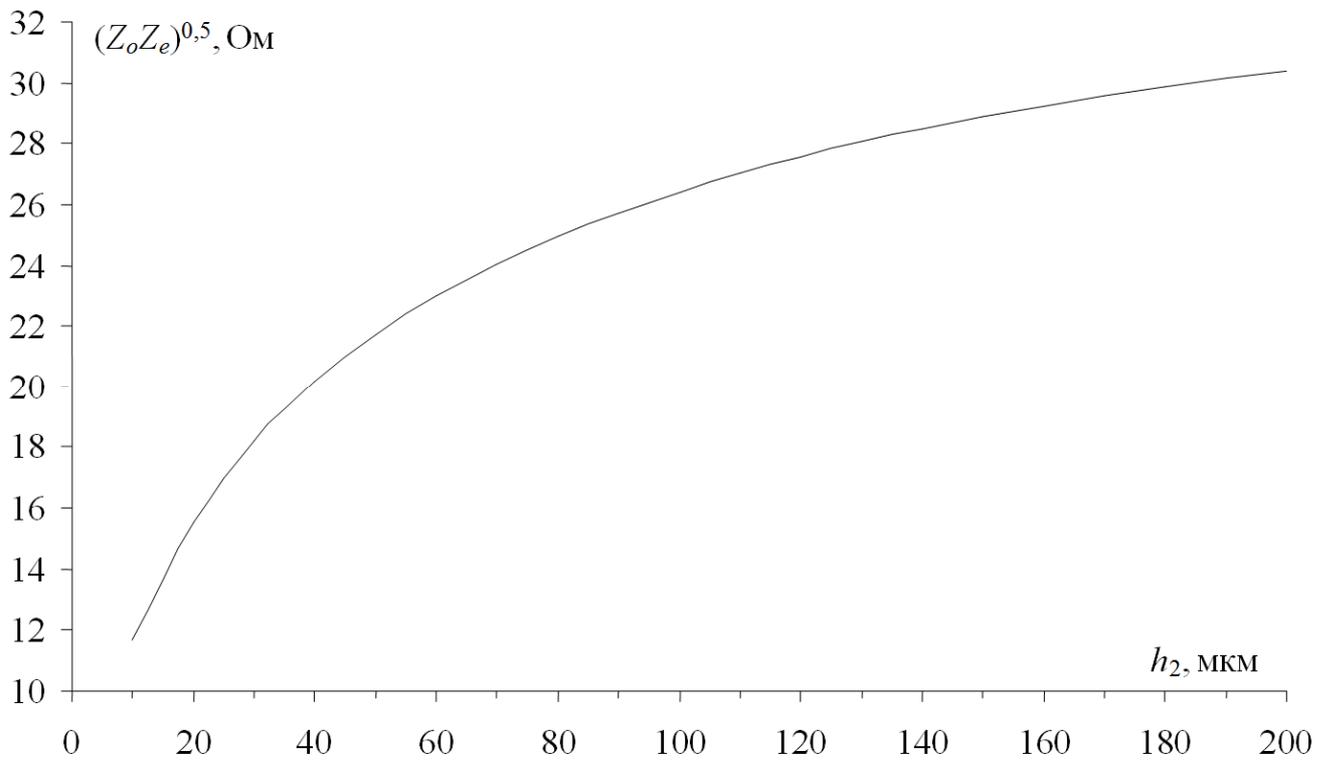


Рисунок 3.41 – Зависимость $(Z_e Z_o)^{0.5}$ от w

Рисунок 3.42 – Зависимость $(Z_e Z_o)^{0.5}$ от ϵ_{r2} Рисунок 3.43 – Зависимость $(Z_e Z_o)^{0.5}$ от h_2

Современные номенклатура радиоэлектронных материалов и возможности технологических процессов изготовления МПП ограничивают спектр геометрических и электрофизических параметров. При разработке стека макета в качестве диэлектрика выбран Rogers RO3010 (раздел 3.4.2), а в качестве препрега – FR 4 1080. Параметры типового процесса изготовления МПП и результаты оптимизации с их учетом сведены в таблицу 3.15 и таблицу 3.16 соответственно. Вычисленные матрицы первичных параметров сведены в таблицу 3.17. Отклик на воздействие импульса и зависимости $(Z_e Z_o)^{0,5}$ показаны на рисунках 3.44, 3.45 соответственно.

Таблица 3.15 – Параметры типового процесса изготовления МПП

w , мкм	t , мкм	h_2 , мкм	h_1 , мкм
≥ 130	5...105	≥ 130	≥ 68

Таблица 3.16 – Параметры поперечного сечения МПП макета МР с учетом реальных значений

Параметры							$(Z_e Z_o)^{0,5}$, Ом
w , мкм	t , мкм	h_2 , мкм	h_1 , мкм	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	$ \Delta\tau $, нс/м	50
185	35	130	600	4,25	10,2	2,19	

Таблица 3.17 – Матрицы параметров структуры

\mathbf{L} , нГн/м		\mathbf{C} , пФ/м		\mathbf{Z} , Ом	
524,7	310,9	243,4	-179,5	68	46
310,9	524,7	-179,5	243,4	46	68

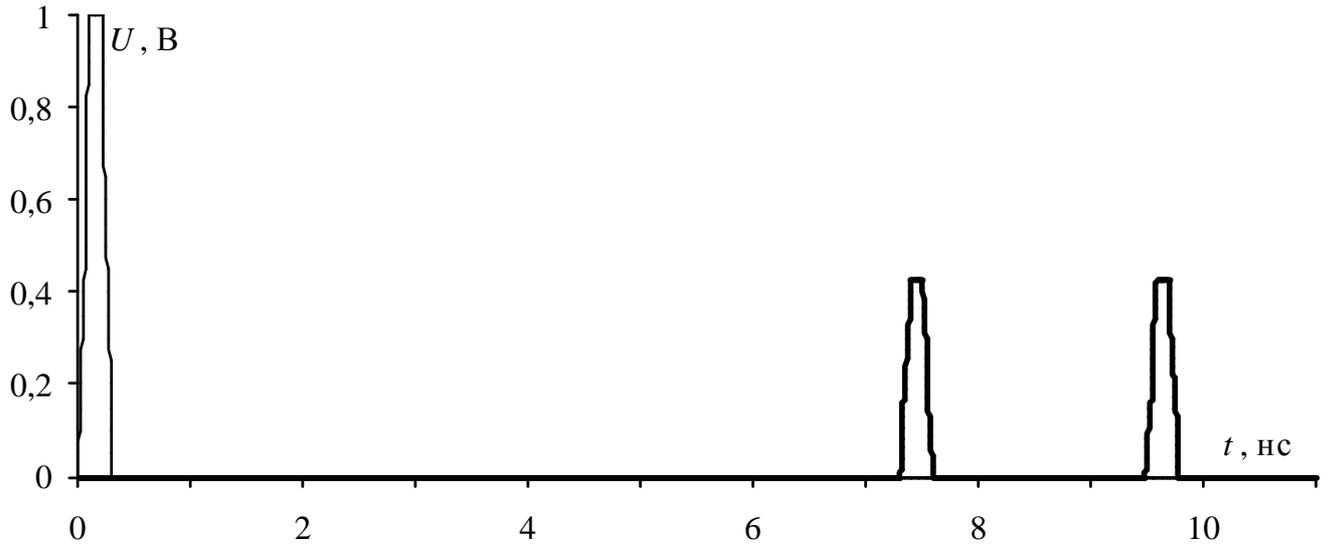


Рисунок 3.44 – Сигналы в начале (–) и конце (=) активной линии оптимизированной структуры

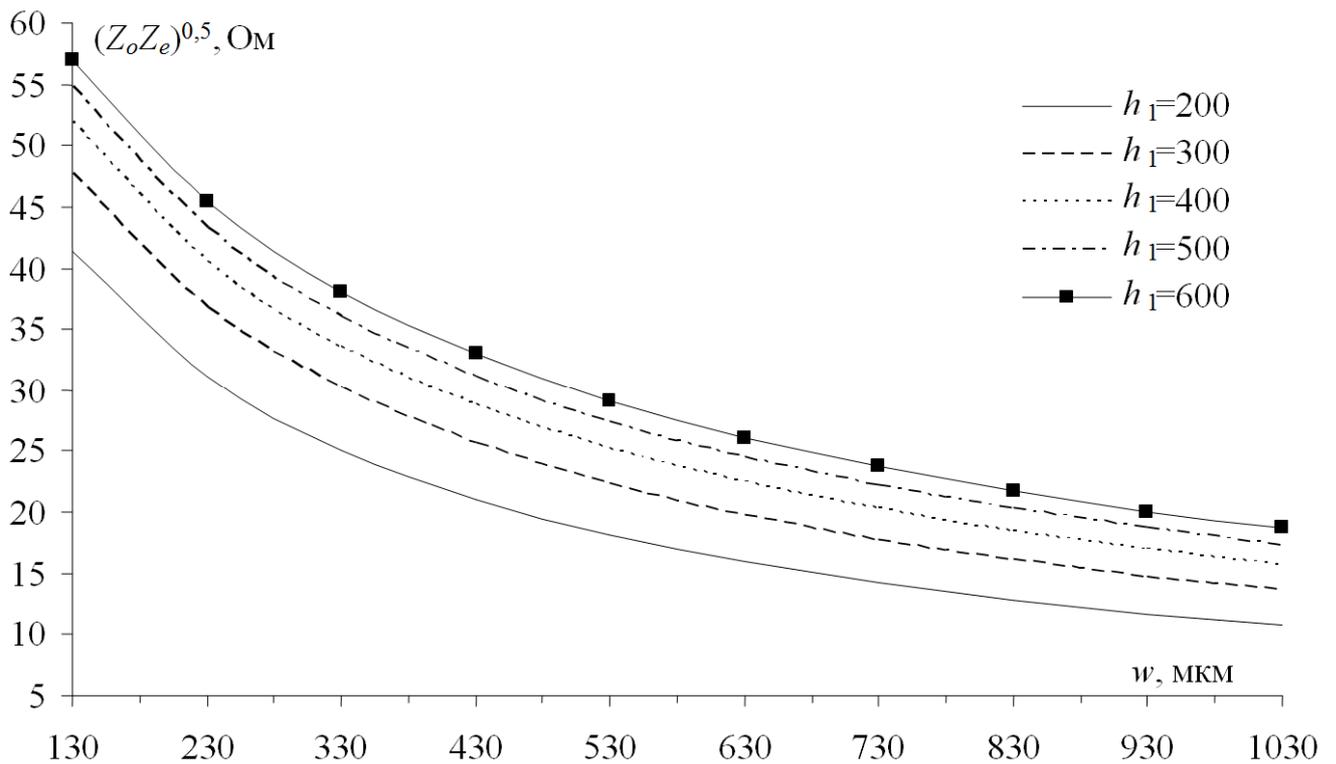


Рисунок 3.45 – Зависимости $(Z_e Z_o)^{0.5}$ от w при разных значениях h_1 , мкм

На рисунке 3.46 показан вычисленный временной отклик на реальное воздействие (с осциллографа С9-11) с учетом оптимизированных параметров

стека МПП при нагрузках на концах линий 50 Ом (длина линии 40 см). Равенство амплитуд импульсов разложения показывает согласованность линий с нагрузками.

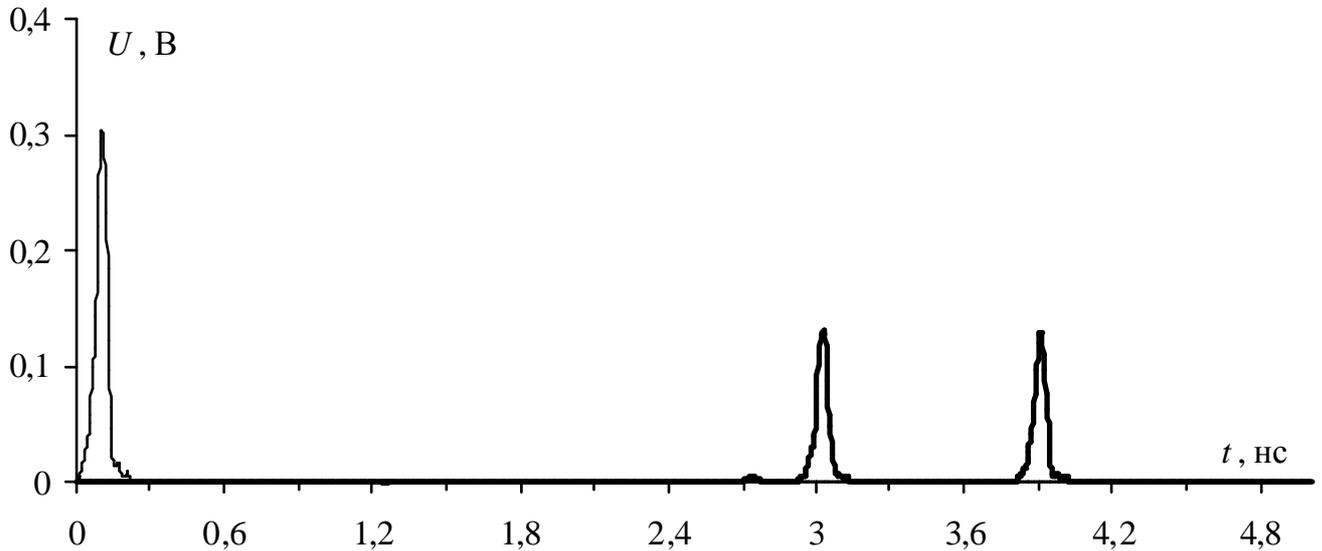


Рисунок 3.46 – Формы напряжения в начале (–) и конце (=) активной линии структуры длиной 40 см

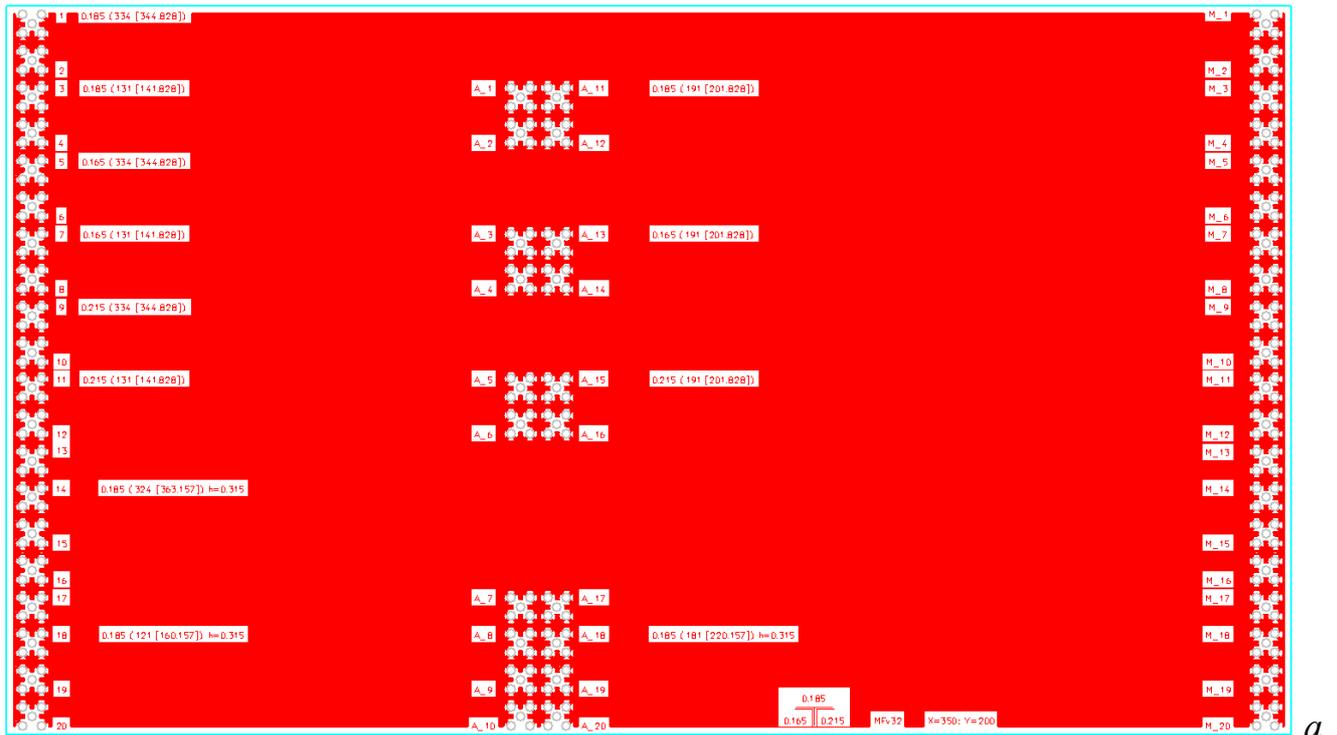
Структурная схема стека МПП с оптимизированными параметрами показана на рисунке 3.47.

Материал	Толщина
Медная фольга	0,035 мм
Препрег FR-4 1080	0,6 мм
Медная фольга	0,035 мм
Rogers RO3010	0,13 мм
Медная фольга	0,035 мм
Препрег FR-4 1080	0,6 мм
Медная фольга	0,035 мм

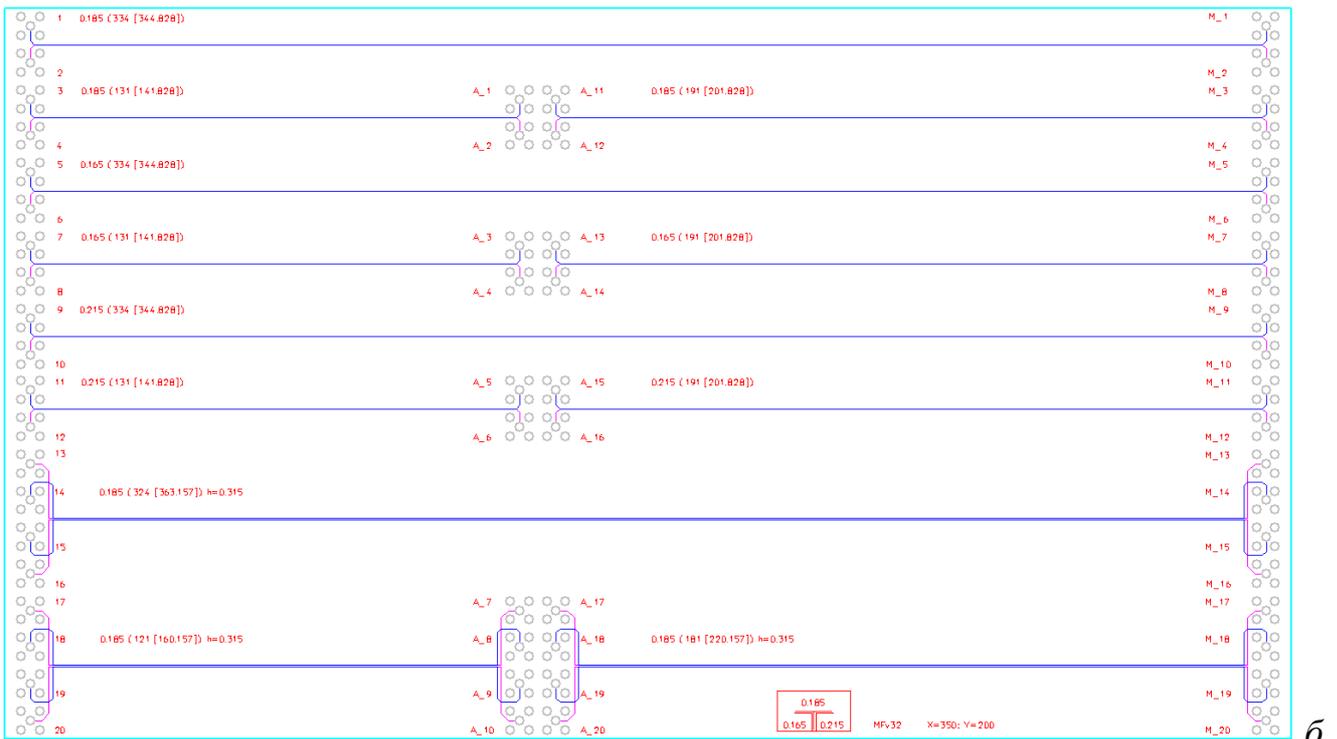
Рисунок 3.47 – Структура слоев МПП (общая толщина МПП 1,47 мм)

3.4.3 Разработка макета

В данном разделе описан макет ПП с МР. Его разработка выполнена в системе автоматизированного проектирования P-CAD. Вид МПП (размеры $350 \times 200 \text{ мм}^2$) приведен на рисунке 3.48. Макет включает наборы (по количеству и длине линий) электрических соединений, спроектированных с учетом разрабатываемого способа МР [82]. Кроме изначального варианта однократного резервирования (рисунок 3.37) реализован вариант для резервирования двух линий с сильной торцевой связью (рисунок 2.21), позволяющий оценить влияние плотности монтажа печатных трасс на модальные искажения и условия согласования линий. Этот вариант можно рассматривать и как трехкратное МР. Макет содержит посадочные места для соединителей SMA, подключенные к концам резервируемых и резервных электрических соединений. Данное решение позволяет проводить измерения в любой интересующей линии, а также задавать необходимые граничные условия на их концах.



а



б

Рисунок 3.48 – Виды макета МПП с МР:
сторона слоя «top» (а); внутренние слои «inner1», «inner2» (б)

Для однократного МР на макете реализовано 6 наборов связанных линий (рисунок 3.49). Выбрано три значения ширины трасс ($w=165; 185; 215$ мкм).

Значения 165 и 215 выбраны с учетом максимальной погрешности техпроцесса изготовления ПП, предоставленной предполагаемым изготовителем. Для каждой ширины выбрано три значения длины линии: 141; 185; 334 мм. Это длина только участка совместного пролегания трасс (подводки к соединителям SMA не учитываются). Расстояние между наборами линий 20 мм.

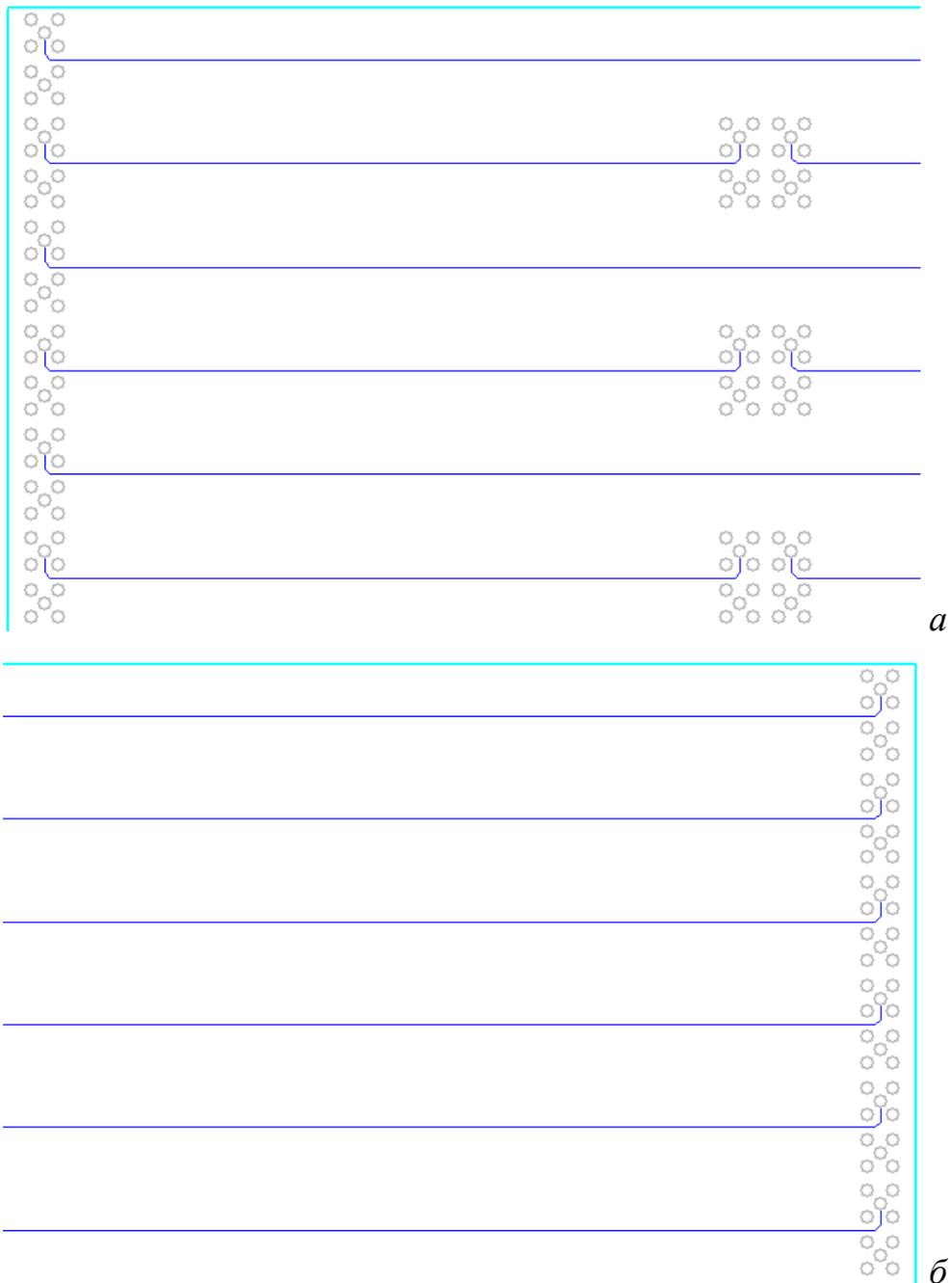


Рисунок 3.49 – Общий вид (слой Inner1) левого фрагмента (а) и правого фрагмента (б) макета МПП с однократным МР

Для трехкратного МР (рисунок 3.50) на макете реализован только вариант с $w=185$ мкм. Реализовано три значения длины линий: 121; 181; 324 мм. Расстояние между трассами на одном слое (s на рисунке 2.21) равно 315 мкм. Расстояние между наборами линий 40 мм. Для определения реальных значений ширины трасс ПП, на одном из краев платы сделан вырез верхнего слоя (рисунок 3.51).

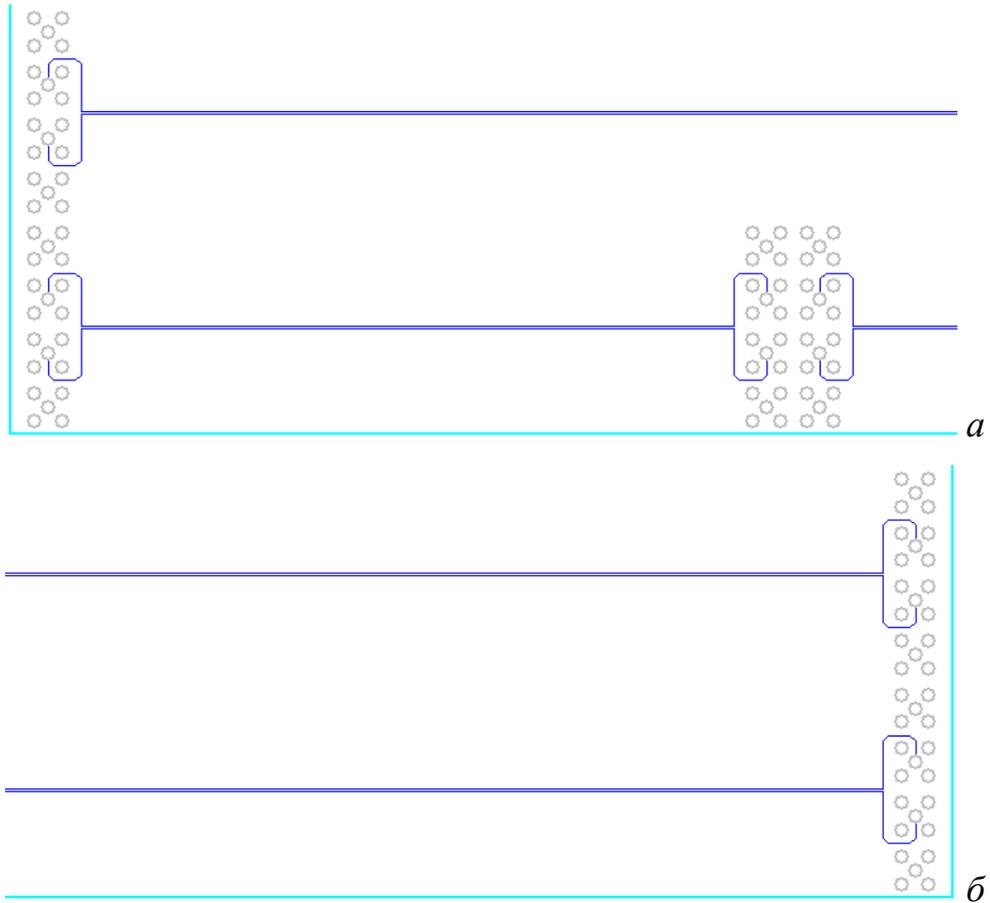


Рисунок 3.50 – Общий вид (слой Inner1) левого фрагмента (а) и правого фрагмента (б) макета МПП с трехкратным МР



Рисунок 3.51 – Фрагмент МПП (слой Top) с вырезами в верхнем слое для определения реальных значений ширины трасс

Таким образом, разработанная МПП позволит измерять частотные и временные характеристики электрических соединений, выполненных по предложенным способам МР, с учетом влияния плотности монтажа и различных нагрузок на их концах.

3.4.4 Электродинамическое моделирование

В данном разделе представлены результаты электродинамического моделирования натурального эксперимента, подтверждающие возможность модальных явлений в цепях с резервированием. Вычисления проводились с учетом потерь в проводниках и диэлектриках в системе CST MWS. Моделировались двухпроводная (однократное МР) и четырехпроводная (трехкратное МР) структуры. Поперечные сечения для структур представлены на рисунках 3.52а и 3.53а, а принципиальные схемы, отражающие подключение к проводникам – на рисунках 3.52 б и 3.53б соответственно.

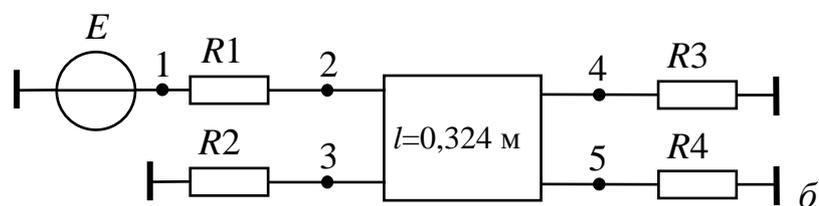
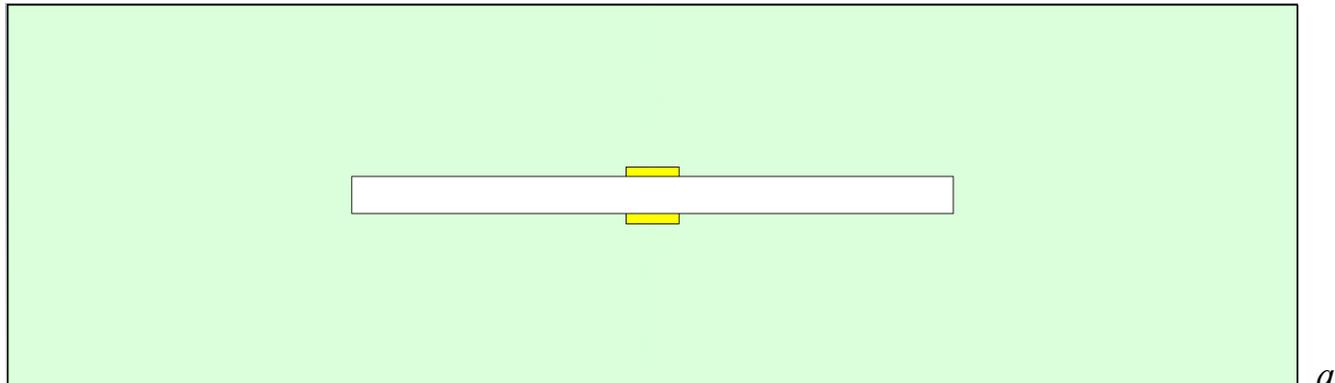


Рисунок 3.52 – Поперечное сечение в CST MWS (а) и принципиальная схема двухпроводной структуры (б)

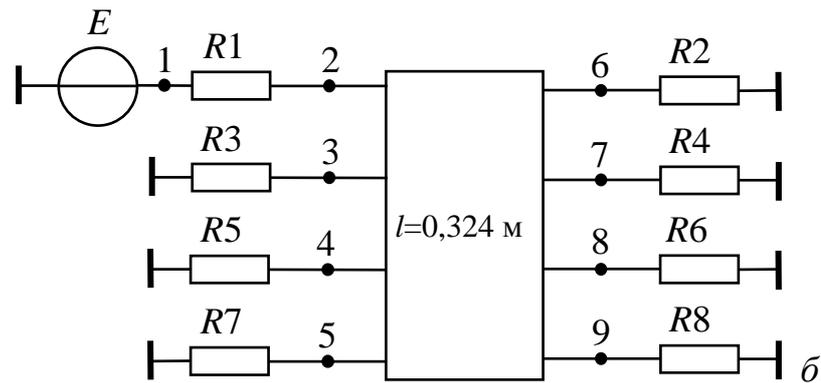
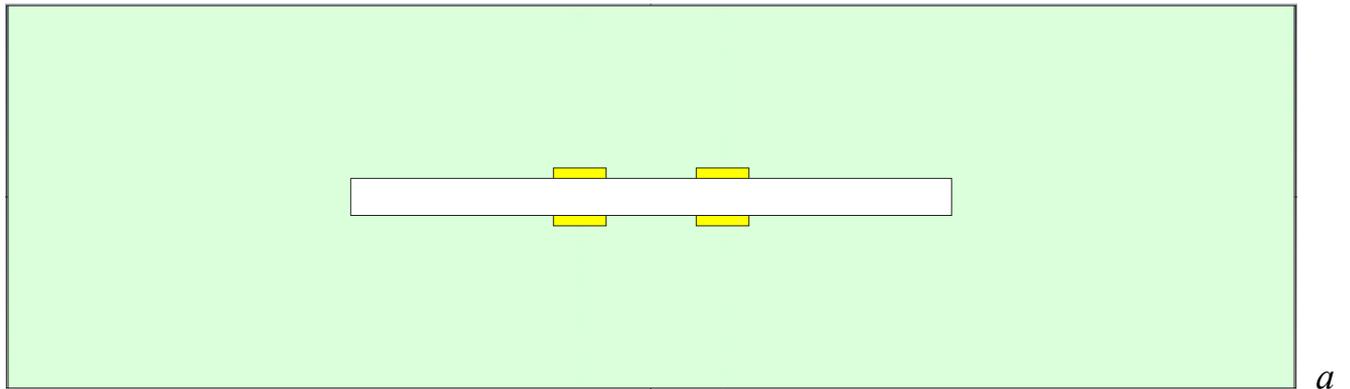


Рисунок 3.53 – Поперечное сечение в CST MWS (а)
и принципиальная схема четырехпроводной структуры (б)

При моделировании номинал всех резисторов выбран равным 50 Ом. Моделирование проводилось для структур длиной 0,324 м. Для диэлектрика Rogers RO3010 полагалось, что $\epsilon_r=10,2$ и $\text{tg}\delta=22*10^{-4}$, для препрега FR-4 – $\epsilon_r=4,3$ и $\text{tg}\delta=25*10^{-3}$.

Результаты моделирования отклика, коэффициентов передачи и отражения для двухпроводной структуры представлены на рисунках 3.54 и 3.55, а для четырехпроводной – на рисунках 3.56 и 3.57. Задержки импульсов и их разности, полученные из временного отклика структур, приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Задержки импульсов и их разности

Структура	Задержки импульсов и их разности		
	t_1 , нс	t_2 , нс	Δt , нс
Двухпроводная	2,85	3,94	1,09
Четырехпроводная	2,26	3,15	0,89

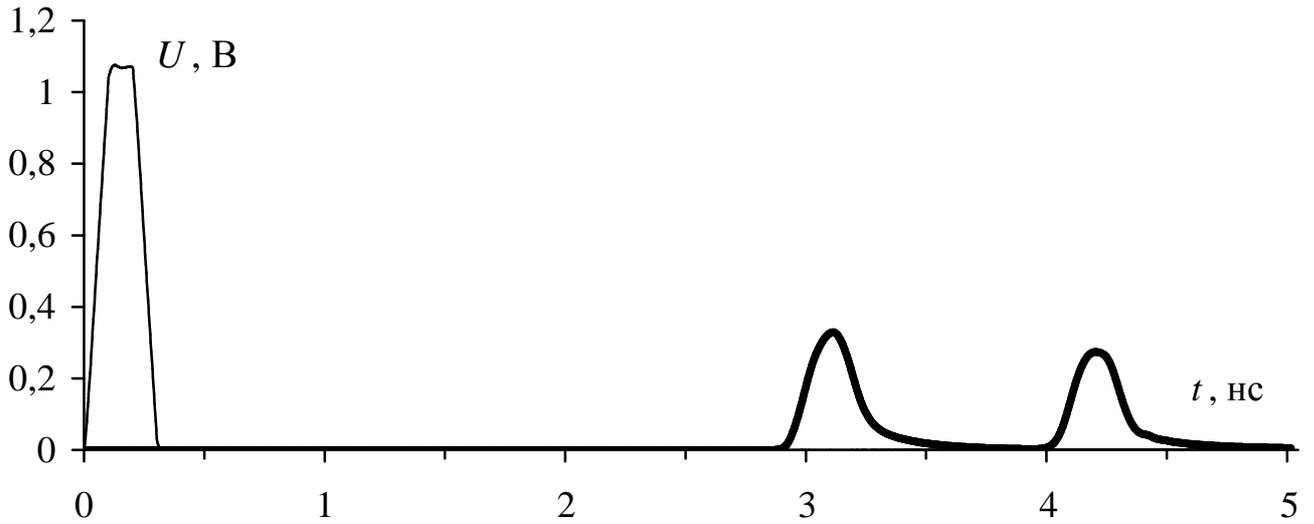


Рисунок 3.54 – Формы напряжения в начале (→) и конце (←) активного проводника двухпроводной структуры

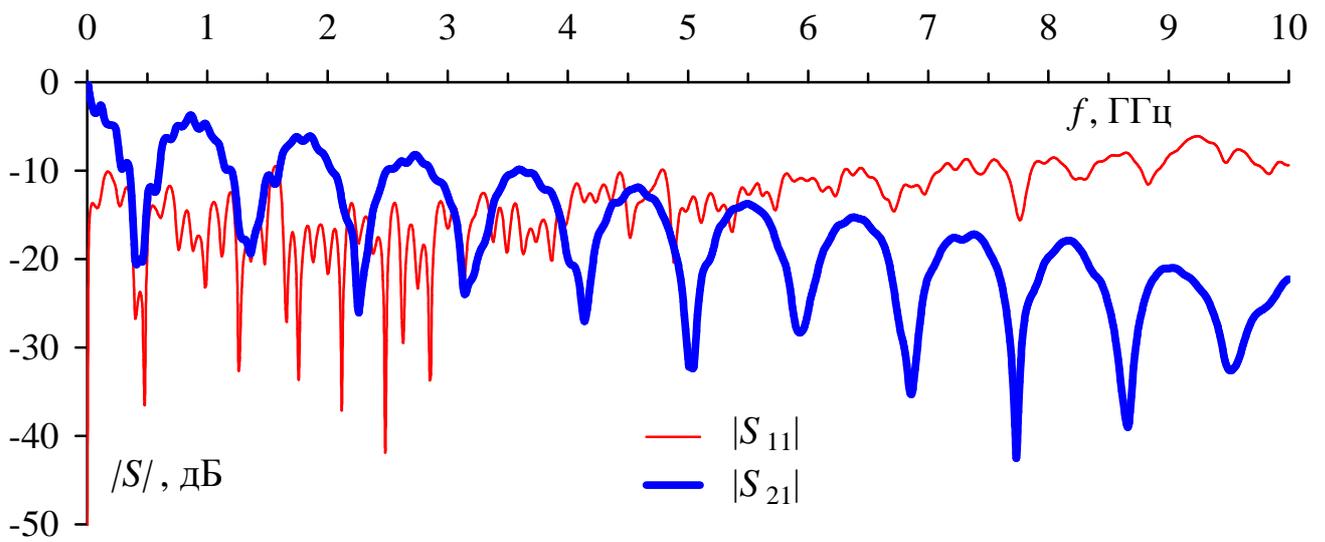


Рисунок 3.55 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ двухпроводной структуры

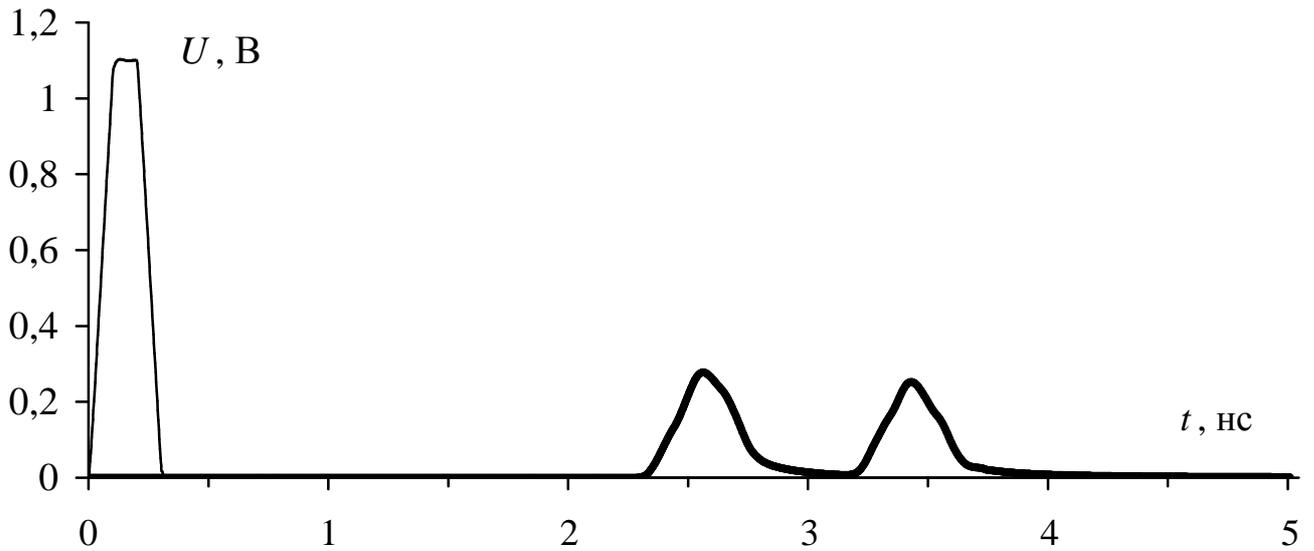


Рисунок 3.56 – Формы напряжения в начале (←) и конце (⇒) активного проводника четырехпроводной структуры

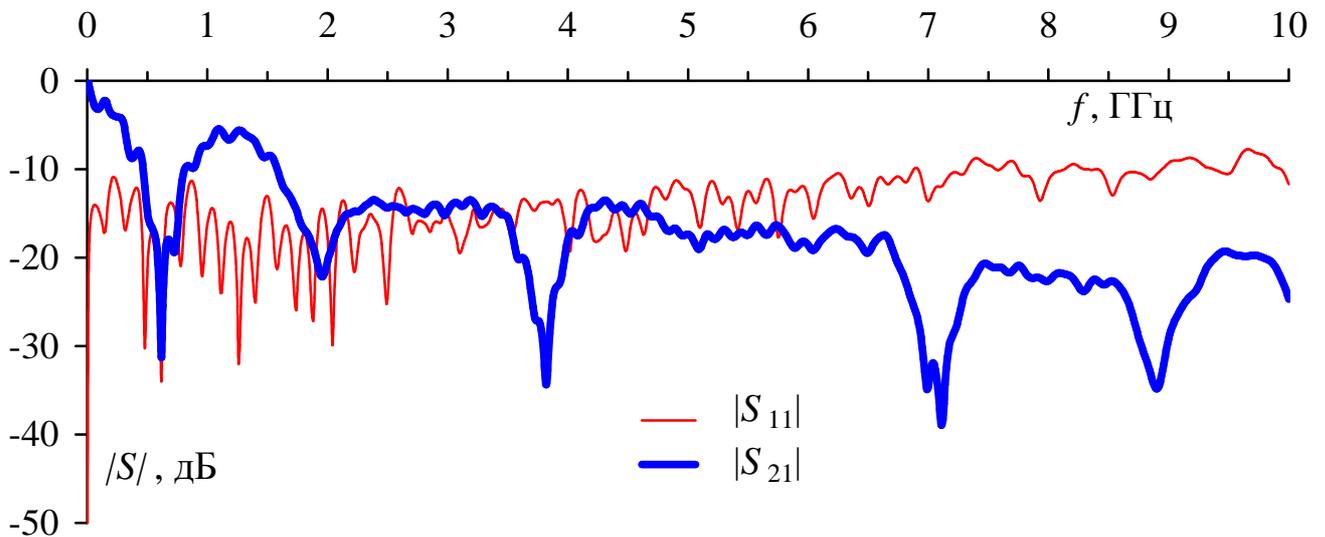


Рисунок 3.57 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ четырехпроводной структуры

3.4.5 Измерения

В данном разделе представлены результаты испытаний разработанной конструкции МПП для цепей с МР, выполненные с помощью скалярного

анализатора цепей P2M-40 и вычислительного комбинированного осциллографа С9-11. Приведены частотные зависимости $|S_{21}|$ и результаты измерения параметров форм напряжения в начале и конце активного проводника структуры.

При измерениях форм импульсного сигнала использовался разработанный макет МПП (рисунок 3.58). В качестве нагрузки использовались терминирующие резисторы номиналом 50 Ом. Воздействие подавалось между опорным и активным проводниками через формирователь импульса П-2.084.080 (внутреннее сопротивление $R=50$ Ом и максимальная амплитуда сигнала 10 В). Параметры сигнала, измеренные на выходе формирователя импульса на нагрузке 50 Ом, приведены в таблице 3.19. Измерения исходного импульса производились с использованием аттенюатора 20 дБ. Фотография формы напряжения на выходе формирователя импульса П приведена на рисунке 3.59. Измеренное время задержки самого быстрого импульса (с учетом предела допускаемой погрешности 7,5 % для осциллографа С9-11) составляет $2,88 \pm 0,22$ нс (рисунок 3.59б), что соответствует задержке 2,85 нс, полученной моделированием временного отклика (таблица 3.18). На рисунке 3.60 приведен оцифрованный сигнал на выходе формирователя сигнала П и в конце активного проводника структуры.

Таблица 3.19 – Параметры сигнала на выходе формирователя импульса П

Тип сигнала	Треугольный импульс
Амплитуда	320 мВ
Фронт (0,1-0,9)	340 пс
Спад (0,1-0,9)	340 пс
Длительность (0,5)	240 пс
Горизонтальная развертка	1 нс/дел
Вертикальная развертка	50 мВ/дел



Рисунок 3.58 – Фотография изготовленного макета
с подключенным к нему скалярным анализатором цепей P2M-40

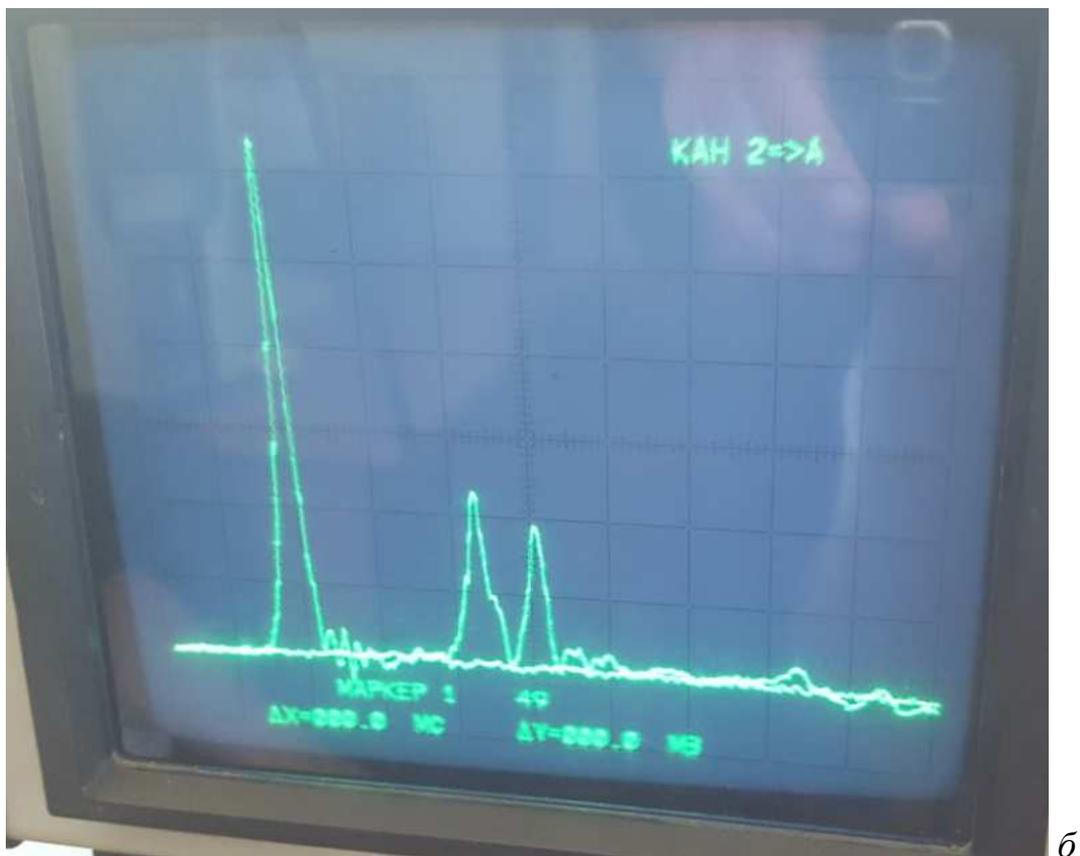
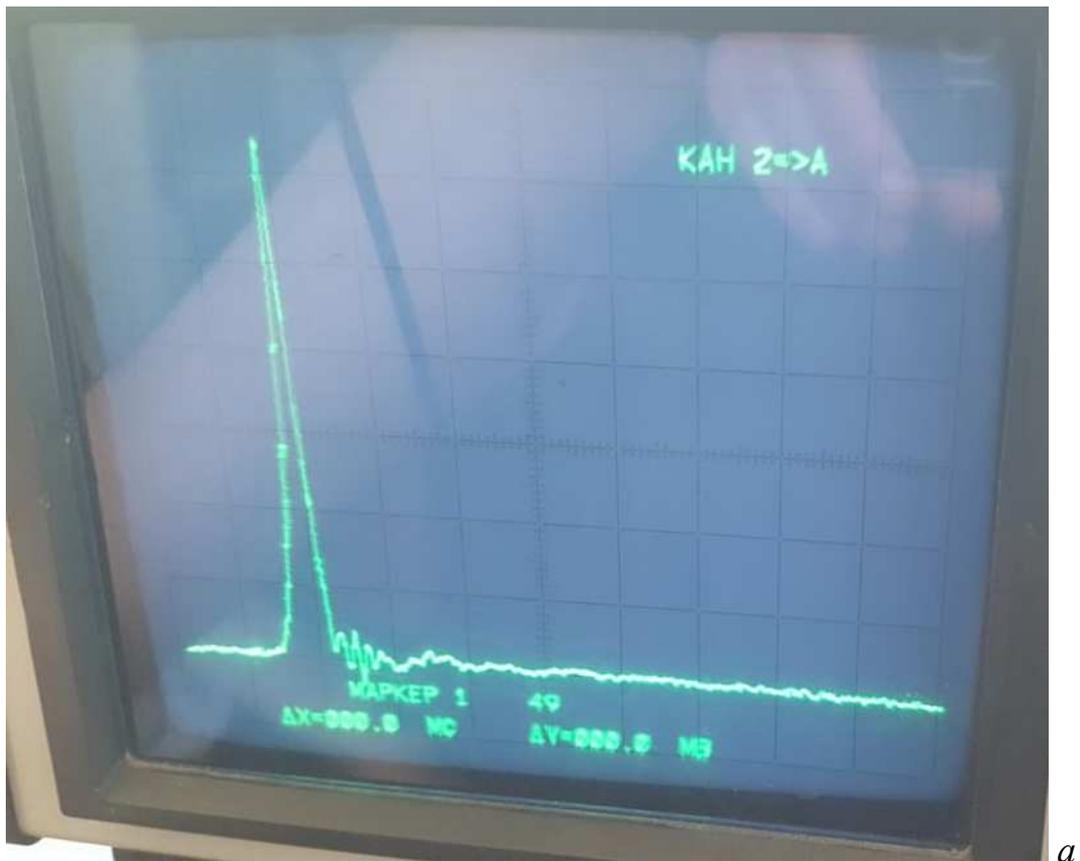


Рисунок 3.59 – Формы напряжения на выходе формирователя импульса II (а) и в конце активного проводника структуры совместно с первой (б)

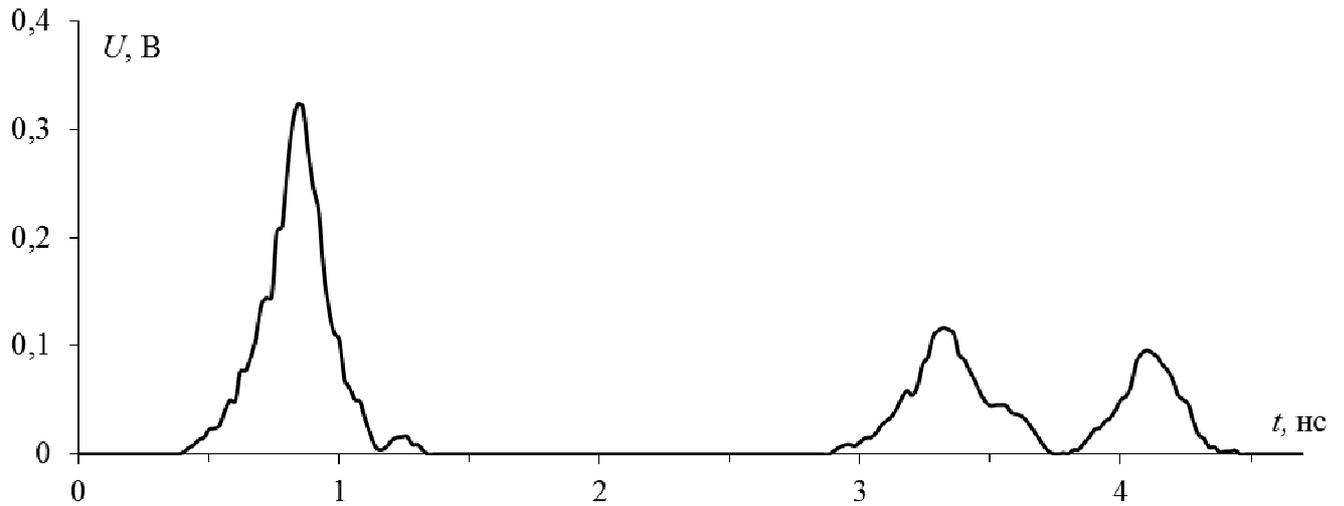


Рисунок 3.60 – Оцифрованные сигналы на выходе формирователя импульса II и на выходе активного проводника структуры

На рисунке 3.61 показаны частотные зависимости $|S_{21}|$, полученные с помощью P2M-40: при ширине проводника 165, 185 и 215 мкм. Максимальное ослабление сигнала происходит на частотах: 3,6 ГГц для 165 мкм, 1,6 ГГц для 185 мкм и 2,2 ГГц для 215 мкм. Ширина спектра, для которого ослабление не превышает 3 дБ составляет примерно 63 МГц для всех значений ширины проводника.

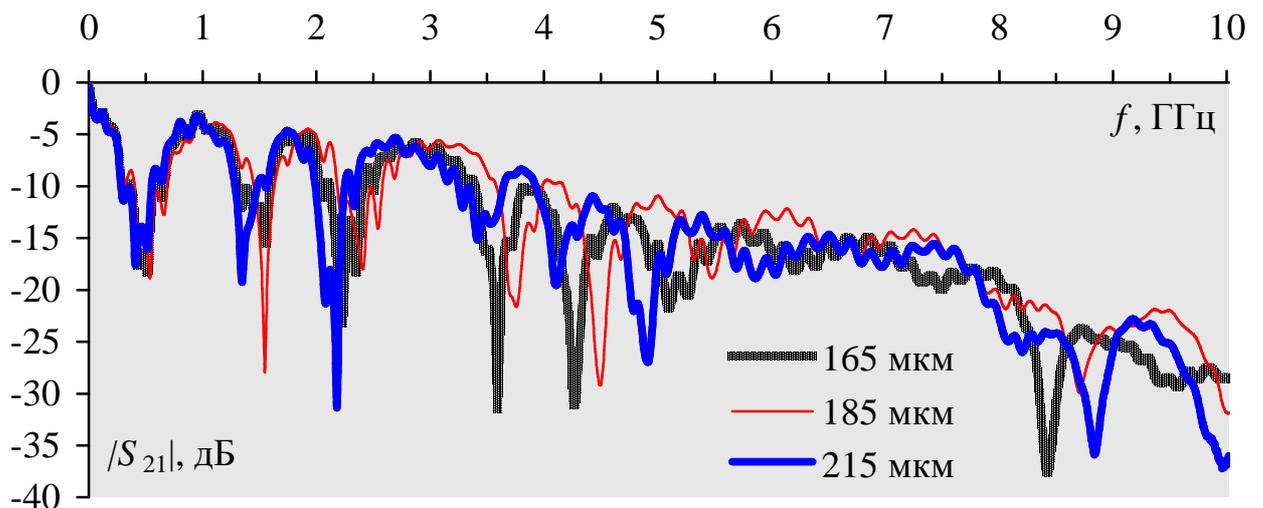


Рисунок 3.61 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ при изменении ширины проводника

3.4.6 Сравнение результатов моделирования и измерений

Сравним вычисленные и измеренные формы сигналов (рисунок 3.62) и частотные зависимости $|S_{21}|$ (рисунок 3.63). Различие результатов вычислительного и натурального экспериментов обусловлено неоднородностями межсоединений макета (которые не учитываются при моделировании), разбросом геометрических и электрофизических параметров реальной структуры и их отличием от параметров модели, а так же частотными характеристиками терминирующих резисторов и соединителей (рисунок 3.64).

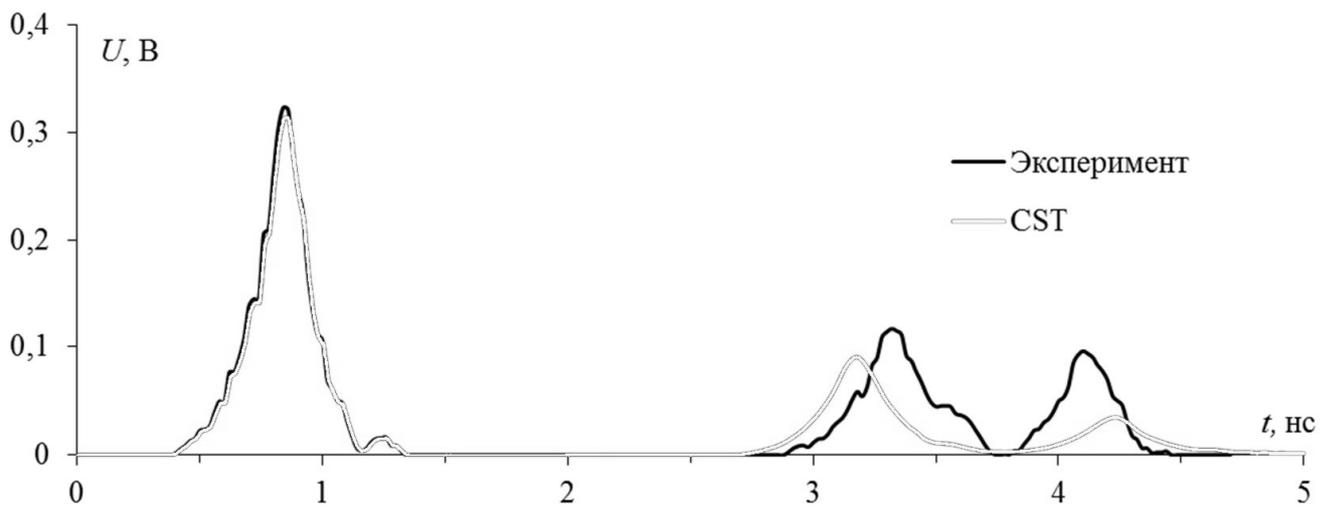


Рисунок 3.62 – Вычисленные и измеренные формы напряжения в конце активного проводника структуры

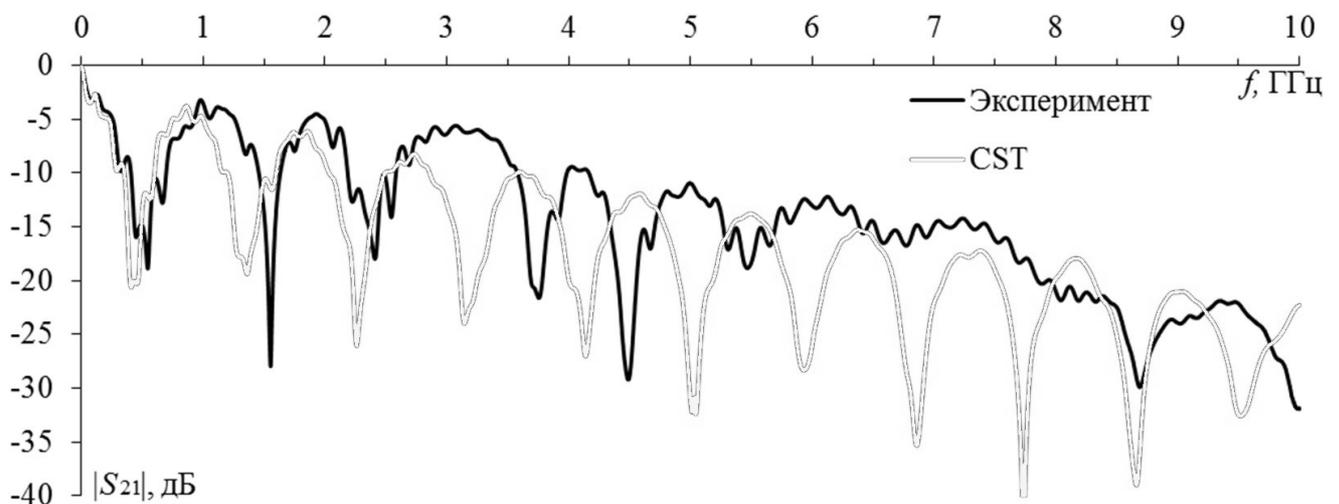


Рисунок 3.63 – Вычисленные и измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$

Представим оценку различия сравниваемых результатов натурального и вычислительного экспериментов (таблицы 3.20, 3.21). Вычисленные и измеренные значения первой резонансной частоты отличаются на 14,3 %. Максимальное различие результатов по времени не превышает $\pm 2,3$ %, а по амплитуде достигает $\pm 46,5$ %.

Таблица 3.20 – Вычисленные (В) и измеренные (И) значения первой резонансной частоты

Значение первой резонансной частоты, МГц		$\frac{f_B - f_I}{f_B + f_I}, \%$
В	И	
410	547	$\pm 14,3$

Таблица 3.21 – Сравнение результатов вычисления (В) и измерения (И) амплитуды напряжения (U) и времени задержки (t)

Номер импульса	В		И		$\frac{(U_B - U_I)}{U_B + U_I}, \%$	$\frac{(t_B - t_I)}{t_B + t_I}, \%$
	U_B , мВ	t_B , нс	U_I , мВ	t_I , нс		
1	90,2	2,75	115	2,88	$\pm 12,1$	$\pm 2,3$
2	34,2	3,82	93,6	3,88	$\pm 46,5$	$\pm 0,8$

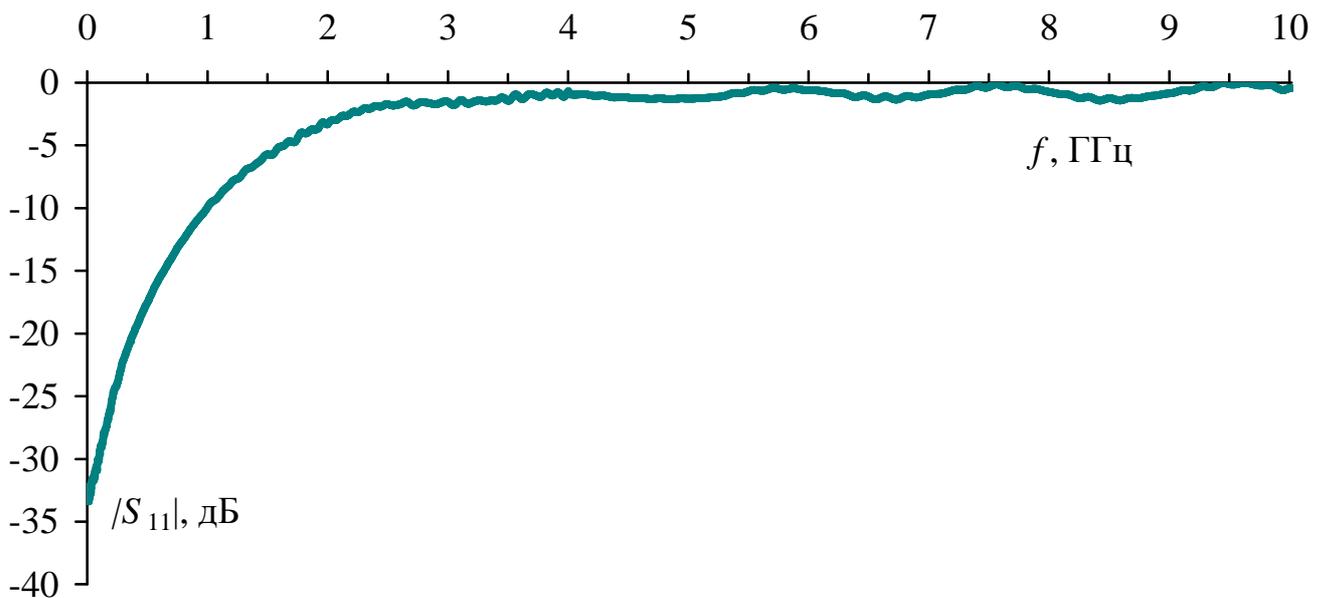


Рисунок 3.64 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ терминирующего резистора

Таким образом, натурный и вычислительный эксперименты на изготовленном макете подтвердили возможность реализации МР.

3.5 Основные результаты раздела

Рассмотрены специальные компоненты и способ компоновки неформованных компонентов необходимые для эффективного размещении компонентов РЭА на ПП с МР.

Рассмотрено модальное резервирование в реальной САН КА. На основании проектирования сделаны выводы о том, что способствует рациональном размещении элементов на ПП, позволяющему реализации МР. Даны рекомендации по реализации МР.

Выполнено квазистатическое моделирование распространения СКИ в ПП САН КА, показывающее результативность применения МР в реальных ПП.

Разработана конструкция МПП для макета, реализующего принципы МР. Проведена оптимизация стека МПП под волновой тракт 50 Ом с учетом параметров техпроцессов изготовления ПП и электрофизических параметров материалов. На четырехпроводной линии МПП показано, что импульсная помеха разлагается на импульсы меньшей амплитуды с таким же коэффициентом ослабления. Что позволяет говорить о возможности увеличения плотности монтажа ПП. Показано влияние связей между цепями на ослабление импульсной помехи и согласование линии. Результаты компьютерного моделирования и эксперименты подтвердили возможность практической реализации МР.

Заключение

Итоги исследования

1. Представлены способы однократного и трехкратного МР.
2. Представлен способ компоновки неформованных компонентов для МР.
3. Показана реализуемость предложенных способов МР.

Рекомендации

1. Создание новых устройств на основе запатентованных способов.
2. Более точное и детальное моделирование и структурно-параметрическая оптимизация этих устройств.
3. Применение способов однократного МР для обеспечения ЭМС и повышения надежности РЭА.
4. Применение способов трехкратного МР для обеспечения ЭМС и повышения надежности критичной РЭА.

Перспективы дальнейших исследований

1. Формулировка принципов компоновки и трассировки цепей с модальным резервированием с учетом различных видов цепей, топологий, монтажа и структурного уровня.
2. Использование дополнительных импульсов разложения в МР.
3. Подготовка отчета и публикаций.

Список сокращений и условных обозначений*Кириллица*

ГА – генетический алгоритм

ДПП – двухсторонняя печатная плата

ЗРИ – задача распределения избыточности

ИП – источник питания

КА – космический аппарат

МПЛП – многопроводная линия передачи

МР – модальное резервирование

МФ – модальный фильтр

МПЛ – микрополосковая линия

МПП – многослойная печатная плата

НИР – научно-исследовательская работа

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ПНИ – прикладное научное исследование

ПП – печатная плата

ПТМП – помехозащищенная теплопроводная монтажная плата

РПУ – радиоприемное устройство

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

САН – система автономной навигации

СКИ – сверхкороткий импульс

ТЗ – техническое задание

ФЦП – федеральная целевая программа

ЦОС – цифровая обработка сигналов

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭДС – электродвижущая сила

ЭМП – электромагнитная помеха

ЭМС – электромагнитная совместимость

Латиница

NSMT – метода модуляции источника помехи

SMD – компонент с поверхностным монтажом

Список литературы

1. Козлов Б.А. Резервирование с восстановлением // М.: Советское радио, 1969. – 152 с.
2. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения.
3. Беломытцев В. Замена элементов управляющей вычислительной системы без отключения питания // Современные технологии автоматизации. 2000. №2. С. 72–77.
4. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №4. – С. 86–97.
5. Денисенко В.В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. – 2008. – №2. – С. 90–99.
6. Розенблат М.А. Резервирование аналоговых устройств автоматики / М.А. Розенблат, Т.М. Золотова, Ф.И. Кербников // 2-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
7. Говоренко Г.С. Обеспечение показателей надежности и качества бортовых систем управления летательных аппаратов на этапах жизненного цикла // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2011. – С. 1–8.
8. Bolvashenkov I. Methodology for quantitative assessment of fault tolerance of the multi-state safety-critical systems with functional redundancy / I. Bolvashenkov, J. Kammermann, H. Hans-Georg // 2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT). – 2017. – P. 74–82.

9. Сивякова Г.А. Резервирование промышленных электроприводов / Г.А. Сивякова, Л.Г. Лимонов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – №19. – С. 83–87.
10. Русанов В.Н. Анализ структур и надежности бортовых вычислительных систем / В.Н. Русанов, С.А. Королев, Н.В. Сильянов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – №7. – С. 18–30.
11. Русанов В.Н. Самодиагностируемая трехканальная бортовая вычислительная система с резервированием замещением / Русанов В.Н., А.Ю. Киселев, Н.В. Сильянов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – №3. – С. 23–32.
12. Использование резервирования критических узлов бортовой аппаратуры для увеличения сроков активного существования космических аппаратов / В.Ф. Зинченко, К.В. Лаврентьев, Р.Г. Усеинов, В.М. Ужегов, Н.Н. Булгаков, А.С. Семочкин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2016. – №1. – С. 22–28.
13. Логинов И.С. Исследование системы резервирования цепей управления космического аппарата / И.С. Логинов, Л.А. Белов, И.С. Садилкин // XXII международная научно-техническая конференция «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – 2016. – С. 29.
14. Синтез схемы управляемого мажоритарного элемента для резервированных систем управления / Р.С. Кулиев, С.Н. Сыщевич, Ж.Ж. Жабоев, И.И. Таукенов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – №9. – С. 63–66.

15. Soloviev A. Methods of increasing the fault-tolerance of control unit by introducing hardware redundancy / A. Soloviev, A. Stempkovsky, D. Kaleev // 2015 Internet Technologies and Applications (ITA). – 2015. – P. 37–40.
16. Xing L. Reliability analysis of nonrepairable cold-standby systems using sequential binary decision diagrams / L. Xing, O. Tannous, J.B. Dugan // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans. – 2011. – P. 715–726.
17. Lobur M. Reliability modeling of bridge structure system with load-sharing taking into account / M. Lobur, S. Shcherbovskykh, T. Stefanovych // 2016 XII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). – 2016. – P. 87–89.
18. Lobur M. Modelling of type I and II errors of switching device for systems with hot and cold redundancy based on two-terminal dynamic fault tree / M. Lobur, S. Shcherbovskykh, T. Stefanovych // 2017 14th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). – 2017. – P. 19–21.
19. Boddu P. Redundancy allocation for k-out-of-n: G Systems with Mixed Spare Types / P. Boddu, L. Xing // 2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. – 2012. – P. 1–6.
20. Feizollahi J. The robust cold standby redundancy allocation in series-parallel systems with budgeted uncertainty / J. Feizollahi, R. Soltani, H. Feyzollahi // IEEE Transactions on Reliability. – 2015. – P. 799–806.

21. Levitin G. Effect of failure propagation on cold vs. hot standby tradeoff in heterogeneous 1-out-of-N:G systems // IEEE Transactions on Reliability. – 2014. – P. 410–419.
22. Moghaddass R. Optimal design of a repairable k-out-of-n system considering maintenance / R. Moghaddass, J.M. Zuo // 2011 Proceedings – Annual Reliability and Maintainability Symposium. – 2011. – P. 1–6.
23. Mok Y.L. Redundancy modeling for the X-sat microsatellite system / Y.L. Mok, C.H. Goh, R.C. Segaran // 2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – 2013. – P. 1–6.
24. Anwer J. FPGA redundancy configurations: an automated design space exploration / J. Anwer, M. Platzner, S. Meisner // Parallel & Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW), 2014 IEEE International. – 2014. – P. 275–280.
25. Jiménez J. SafeSoC: a fault-tolerant-by-redundancy evaluation card for high speed serial communications / J. Jiménez, U. Bidarte, C. Cuadrado // Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), 2016 Conference on. – 2016. – P. 1–4.
26. Yu J. Redundancy optimization of standby phased-mission systems / J. Yu, T. Hu, J. Yang // Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS), 2010 International Conference on. – 2010. – P. 395–398.
27. Barave P.S. Hybrid AC/DC power distribution solution for future space applications / P.S. Barave, H.B. Chowdhury // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2007. – P. 1–4.
28. Momoh A.J. Maximizing serviceability of a ring-bus power system in an spacecraft by implementing multiple objectives / A.J. Momoh, K. Xu //

- 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – 2006. – P. 909–914.
29. Lingjie K. Analysis on power supply and distribution system for spacecraft based on reliability / K. Lingjie, Y. Shanshui, W. Li // 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). – 2013. – P. 1–9.
30. Бганцева С.М. Обеспечение надежности бортовой аппаратуры космического аппарата / С.М. Бганцева, Ю.В. Ягудина // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства”. – 2018. – С. 293–294.
31. Бугай Т.В. Рекомендации по проектированию печатных плат для обеспечения защиты космической аппаратуры от возникновения и развития дугового разряда / Т.В. Бугай, В.В. Быков, А.М. Гильжинский // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства”. – 2018. – С. 72–73.
32. Хандорин М.М. Прибор управления системой электропитания с резервированным на два отказа микропроцессорным устройством управления / М.М. Хандорин, Е.В. Карпов, Д.В. Иванов // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства”. – 2018. – С. 9–12.
33. Чучупало А.М. Метод резервирования силового преобразователя, имеющего в составе не менее трех силовых блоков, и способ контроля их работоспособности / А.М. Чучупало, В.В. Дерябин // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства”. – 2018. – С. 52–54.

34. Пат. 7724601 США, МПК G11C17/18. Electrical fuses with redundancy / S.C. Chung (US) №12/145,879; заявл. 25.06.2008; выдан 25.05.2010.
35. Пат. 8299768 США, МПК G05F1/575. PWM voltage converter with redundancy and feedback adjustment / H.W. Satterfield (US), L. Pearce (US) №12/622,278; заявл. 19.11.2009; выдан 30.10.2012.
36. Пат. 8242375 США, МПК H05K1/03. Conductive emissions protection / T.A. Hertel (CA), E.H. Soendker (CA), H. Saldivar (CA), №12/212975; заявл. 18.09.2008; выдан 14.08.2012.
37. Пат. 6745370 США, МПК H01L21/66, G11C29/00. Method for selecting an optimal level of redundancy in the design of memories / J. Segal (US), D. Lepejian (US), J. Caywood (US) №09/616,806; заявл. 14.07.2000; выдан 1.06.2004.
38. Пат. 5343429 США, МПК G11C29/00, G11C007/00. Semiconductor memory device having redundant circuit and method of testing to see whether or not redundant circuit is used therein. / A. Nakayama (JP), K. Hirayama (JP), №07/919415; заявл. 27.07.1992; выдан 30.08.1994.
39. Пат. 9676278 США, МПК B60L7/10, B60L11/14, B60L1/02, B60L15/20, B60L11/18, B60L3/00, B60L7/12, B60L7/20, B60L1/00, B60L1/14. Vehicle electrical network having at least two energy storage devices, method for operating a vehicle electrical network, and means for the implementation thereof / W. Mueller (DE), №14/207056; заявл. 12.03.2014; выдан 13.06.2017.
40. Пат. 9650000 США, МПК B60R16/033, H02J1/08, H02J7/14, H02J1/10, H02J7/00, B60R16/03. Electrical network for a vehicle, having at least one component that can be activated / S. Decoster (FR), T. Cheng (FR), C. Corniglion

- (FR), R. Rechdan (FR), S. Delion (FR), №14/350226; заявл. 05.10.2012; выдан 16.05.2017.
41. Пат. 9425624 США, МПК В60L1/00, F03D7/02, H02J4/00, F03D9/00, B60R16/03, B64D47/00. Electrical network of an aircraft and method of operation of the electrical network / A. Tardy (FR), №13/392065; заявл. 24.08.2010; выдан 23.08.2016.
42. Пат. 3942028 США, МПК H02J9/06, H02J007/00. Multi-node electrical network / R.H. Baker (MA), №05/515284; заявл. 16.10.1974; выдан 02.03.1976.
43. Пат. 1032508 СССР, МПК 5H 02H. Устройство для резервирования отключения короткого замыкания при отказе защит поврежденного присоединения электроустановки высокого напряжения с двойной (или секционированной) системой шин / Л.В. Бондаревский (СССР), Е.И. Виткин (СССР), №3318028; заявл. 15.07.1981; выдан 30.07.1983.
44. Пат. 20170141559 США, МПК H02H3/04. Method and protection device for monitoring a circuit breaker in an electrical power supply network / J. Blumshein (DE), O. Neugebauer (DE) ; Y. Yelgin (DE). №15353868; заявл. 17.11.2015; выдан 18.05.2017.
45. U. Paoletti. On the noise path determination with the noise source modulation technique // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – October 2017. – Vol. 59, No. 5. – P. 1400–1407.
46. Zhang M.S. Power noise suppression using power-and-ground via pairs in multilayered printed circuit boards / M.S. Zhang, J.F. Mao, Y.L. Long // IEEE

- Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – Vol. 1. – P. 374–385.
47. Shiue G.H. Analysis and design of crosstalk noise reduction for coupled striplines inserted guard trace with an open-stub on time-domain in high-speed digital circuits / G.H. Shiue, J.H. Shiu, P.W. Chiu // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – September 15, 2011. – Vol. 1. – P. 1573–1582.
 48. Chang C.H. Bended differential transmission line using compensation inductance for common-mode noise suppression / C.H. Chang, R.Y. Fang, C.L. Wang // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – April 25, 2012. – Vol. 2. – P. 1518–1525.
 49. Ratio of the worst case noise and the impedance of power distribution network / X. Zhang, Y. Liu, X. Hu, C.K. Cheng // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – June 30, 2014. – Vol. 4. – P. 1325–1334.
 50. Reduction of common-mode and differential-mode noises using timing-offset differential signal / C.C. Yeh, B.R. Huang, K.C. Chen, R.Y. Fang, C.L. Wang // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – November 25, 2015. – Vol. 5. – P. 1818–1827.
 51. Lin D.B. Using stepped-impedance lines for common-mode noise reduction on bended coupled transmission lines / D.B. Lin, C.P. Huang, H.N. Ke // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – March 30, 2016. – Vol. 6. – P. 757–766.

52. Khan Z.A. A novel transmission line structure for high-speed high-density copper interconnects // *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – June 09, 2016. – Vol. 6. – P. 1077–1086.
53. Degraeve A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination / A. Degraeve, D. Pissort // 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Shenzhen, 2016. – P. 211–213.
54. Degraeve A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room condition / A. Degraeve, D. Pissort // 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – Ottawa, 2016. – P. 374–378.
55. Буичкин Е.Н. Совершенствование модальной фильтрации в новых конструкциях печатных плат с резервированием / Е.Н. Буичкин, П.Е. Орлов // *Материалы одиннадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления»*, Томск, 25–27 ноября 2015: В-Спектр, 2015. Ч. 2. – С. 18–21.
56. 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 // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016)*. – Moscow, Russia, May 12–14, 2016. – P. 1–3.
57. Orlov P.E. Method of layout of multilayer PCBs for circuits with redundancy / P.E. Orlov, E.N. Buichkin, T.T. Gazizov // *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016*, pp. 155–158.

58. Новый подход к компоновке плоских кабелей в необслуживаемых летательных аппаратах / Е.Н. Буичкин, П.Е. Орлов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.В. Убайчин // Materials of the XII Int. scien. and pract. conf. "Areas of scientific thought", December 30, 2015 – January 7, 2016, vol. 18. Sheffield, England, pp. 22–24.
59. Orlov P.E. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation / P.E. Orlov, E.N. Buichkin // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2017, pp. 54–58.
60. Orlov P.E. Method of layout of a multilayer PCB for circuits with triple reservation / P.E. Orlov, E.N. Buichkin, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // SIBCON 2017, June 29–30, 2017, Astana, Kazakhstan, pp. 1–4.
61. New concept of critical infrastructure strengthening / T.R. Gazizov, P.E. Orlov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // ICNAAM 2015. – Rhodes, Greece, Sept. 23–29, 2015, pp. 1–3.
62. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: монография / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск: ТУСУР, 2013. – 151с.
63. Заболоцкий А.М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС. – 2006. – №4. – С. 40–44.
64. Возможности применения новых модальных явлений в целях электромагнитного терроризма и для защиты от него / Т.Р. Газизов,

- А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко, Е.П. Горин, И.Г. Бевзенко // Труды VII Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – 2007. – С. 266–269.
65. Патент РФ на полезную модель №79355. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Модальный фильтр. Заявка №2008127527/22(033781). Приоритет полезной модели 07.07.2008. Опубликовано 27.12.2008 Бюл. №36.
66. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.
67. Газизов Т.Р. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – №3(37). – С. 129–131.
68. Заболоцкий А.М. О возможности опасного применения модальных искажений импульсного сигнала / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Электронные средства и системы управления: материалы докладов международной научно-практической конференции. Томск, 6–8 октября 2004 г. – 2004. – С. 112–115.
69. Dangerous pulse excitation of coupled lines / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, A.G. Bova, W.A. Radasky // Proc. of the 17-th Int. Zurich Symp. on EMC. – Singapore, February 27–March 3, 2006. – 2006. – P. 164–167.

70. Патент РФ на изобретение №2431912. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство защиты от импульсных сигналов. Заявка №2010108520/07(012016). Приоритет изобретения 9.03.2010. Опубликовано 20.10.2011 Бюл. №29.
71. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Разложение и восстановление импульсного сигнала в последовательно соединенных отрезках многопроводных линий передачи // Материалы 7-й всероссийской научно-практической конференции "Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности", г. Томск, 16–18 февраля 2005 г. С. 61–64.
72. Заболоцкий А.М. Модальная фильтрация как средство защиты от сверхкоротких импульсов / А.М. Заболоцкий, И.Г. Бевзенко // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: доклады международной 4-й научно-практической конференции. – Томск, 31 октября–3 ноября 2007. – С. 258–260.
73. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Модальные искажения импульсного сигнала в многопроводной линии передачи // Материалы 6-й всероссийской научно-практической конференции "Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности", г. Томск, 2–4 июня 2004 г. С. 125–128.
74. Заболоцкий А.М. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, О.М. Кузнецова–

- Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы. №11, 2004. С. 18–22.
75. О.М. Кузнецова-Таджибаева. Искажения импульсных сигналов в одиночных и связанных полосковых линиях помехозащищённых теплопроводных монтажных плат. Дисс. ... канд. тех. наук. Томск. 2005.
76. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection. Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC. Munich. Germany. September 24–28. 2007. P. 273–276.
77. Орлов П.Е., Газизов Т.Р. Новые подходы к совершенствованию электрических соединений бортовой аппаратуры космических аппаратов: монография // г. Томск: Издательство ТУСУРа, 2013. – 184 с.
78. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Известия вузов. Физика – 2012, – Том 55. №7/2. С. 89–92.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. Патент РФ на изобретение №2603848. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. Способ резервирования плоских кабелей. Заявка №2015156667. Приоритет изобретения 28.12.2015. Опубликовано: 10.12.2016 Бюл. №34.
85. 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.
86. Шарафутдинов В. Р. Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений / В. Р. Шарафутдинов, Т. Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, №2. – С. 26–30. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-26-30
87. Альтшуллер Г. С., Злотин Б. Л., Зусман А. В., Филатов В. И. Поиск новых идей: от озарения к технологии // Теория и практика решения изобретательских задач. – Кишинёв: Картя Молдовенска, 1989. – 381 с.
88. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307.
89. Патент РФ на изобретение №2693838. Шарафутдинов В.Р., Орлов П.Е., Газизов Т.Р. Способ компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на печатных платах для цепей с резервированием. Заявка №2018124928. Приоритет изобретения 06.07.2018. Опубликовано: 05.07.2019 Бюл. №19.
90. Orlov P.E. 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. Kalimullin // Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 18–24 September, 2017. – P. 495–500. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109935.
91. Шарафутдинов В.Р. Модальное резервирование блока цифровой обработки сигналов системы автономной навигации космического аппарата /

- Шарафутдинов В.Р., Орлов П.Е. // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 328–330.
92. Шарафутдинов В.Р. Модальное резервирование источника питания системы автономной наигации космического аппарата / В.Р. Шарафутдинов, П.Е. Орлов // 23-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-23-2017)». –Томск, Россия, 24 ноября, 2017. – С. 85–89. ISBN 978-5-86889-774-0.
93. Дударов С.П. Математические основы генетических алгоритмов: учеб. пособие/ С.П. Дударов. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 56 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ



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



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

УТВЕРЖДАЮ

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



С.Г. Кочура

2019 г.

М.П.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Шарафутдинова Виталия Расимовича

Комиссия в составе:

- начальник отделения проектирования и испытаний РЭА – начальник отделения АО «ИСС» В.Н. Школьный;
- начальник отдела конструирования, технологической подготовки производства печатных плат и систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова;
- начальник группы АО «ИСС», к.ф.-м. н. А.А. Хвалько.

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС» следующих результатов диссертационной работы Шарафутдинова В.Р.:

1. Аналитический обзор общих подходов к разработке технических решений и методов повышения помехоустойчивости и надежности энергосистемы космического аппарата за счет оптимальной компоновки и трассировки электрических соединений.
2. Способы трассировки печатных проводников цепей с резервированием, резервирования для печатных плат и плоских кабелей, а также компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на печатных платах для цепей с резервированием.

Эти результаты отражены в отчетах о прикладном научном исследовании «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» по проекту ФЦП «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, шифр RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

Главный конструктор проектирования и испытаний РЭА – начальник отделения АО «ИСС»


В.Н. Школьный

Начальник отдела конструирования, технологической подготовки производства печатных плат и систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры АО «ИСС», к.т.н.


С.Б. Сунцов

Начальник группы АО «ИСС», к.ф.-м. н.


А.А. Хвалько

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор департамента
образования ТУСУР

д.т.н., профессор

П.Е. Троян

2019



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Шарафутдинова Виталия Расимовича

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по учебной работе, Бусыгина А.В., руководитель магистерской программы кафедры ТУ «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе», к.т.н. Куксенко С.П. настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ результатов диссертационной работы Шарафутдинова В.Р.

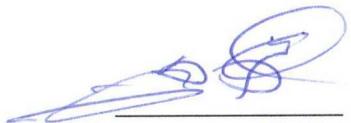
1. Под руководством Шарафутдинова В.Р. была апробирована реализация способов модального резервирования в ходе выполнения выпускной квалификационной работы студентов гр.111 бакалавриата кафедры ТУ, 2015г.: Ганжа А.В., Жалило А.В., Зыряновой Н.А., Сайжановой З.Н. По её результатам всем им присвоена квалификация инженера и выданы дипломы об успешном окончании обучения.

2. Шарафутдинов В.Р. руководил в 2017г. учебной практикой Трубочениновой И.А., Рождественской О.Н., гр. 146-М5 и Смирновой Д.С., гр. 116-М2 по конструированию печатных плат с учетом электромагнитной совместимости в ходе целевой подготовки магистрантов для реализации проекта по развитию системы подготовки кадров для оборонно-промышленного комплекса в образовательных организациях высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки для предприятий оборонно-промышленного комплекса.

Заместитель заведующего каф. ТУ
по учебной работе


/Бусыгина А.В./

Руководитель магистерской программы
«Электромагнитная совместимость
в топливно-энергетическом комплексе»


/Куксенко С.П./

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2624637

СПОСОБ ВНУТРЕННЕЙ КОМПОНОВКИ ПЕЧАТНЫХ
ПЛАТ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015137548

Приоритет изобретения 02 сентября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 05 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 02 сентября 2035 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2614156

СПОСОБ КОМПОНОВКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ
ЦЕПЕЙ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Газизов Тальгат Рашитович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Шарафутдинов Виталий Расимович (RU), Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна (RU), Заболоцкий Александр Михайлович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Буичкин Евгений Николаевич (RU)*

Заявка № 2015137532

Приоритет изобретения 02 сентября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 марта 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 02 сентября 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2603851

СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ С
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015129263

Приоритет изобретения 16 июля 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 ноября 2016 г.

Срок действия патента истекает 16 июля 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2603850

СПОСОБ ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ
ЦЕПЕЙ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015129253

Приоритет изобретения 16 июля 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 ноября 2016 г.

Срок действия патента истекает 16 июля 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2603848

СПОСОБ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ КАБЕЛЕЙ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015156667

Приоритет изобретения 28 декабря 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 ноября 2016 г.

Срок действия патента истекает 28 декабря 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.Н. Ивлиев Г.Н. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2693838

**СПОСОБ КОМПОНОВКИ НЕФОРМОВАННЫХ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU)*

Авторы: *Шарафутдинов Виталий Расимович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2018124928

Приоритет изобретения 06 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 05 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 июля 2038 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Израиль

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2663230

**СПОСОБ ТРЕХКРАТНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЦЕПЕЙ
В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU)*

Авторы: *Газизов Тальгат Рашитович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Шарафутдинов Виталий Расимович (RU)*

Заявка № 2017113045

Приоритет изобретения 14 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 02 августа 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 14 апреля 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2603843

СПОСОБ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015137547

Приоритет изобретения 02 сентября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 ноября 2016 г.

Срок действия патента истекает 02 сентября 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

