

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

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2019

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

Научный руководитель: **Газизов Тальгат Рашитович**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Увайсов Сайгид Увайсович**  
доктор технических наук, профессор, МИРЭА-  
Российский технологический университет

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится «25» декабря 2019 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте:  
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/fzywp7eo>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2019 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



Мандель Аркадий Евсеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Важной задачей проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение заданной надежности 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). Это особенно 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: науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2015, 2016 г.; Межд. науч.-практич. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2016, 2017 г.; Межд. науч.-практич. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018 г.; Тезисы докладов науч.-тех. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2018 г.; Всероссийская науч.-тех. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2016 г.; Межд. конф. молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM, Эрлагол, Республика Алтай, 2017, 2018 г.; Межд. конф. «Информационные технологии в бизнесе и промышленности», ТПУ, г. Томск, 2018 г.; Межд. мульти-конф. 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: 22 работы (2 без соавторов), в т.ч. 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 4 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, 6 докладов в трудах отечественных конференций, 2 тезисов в трудах отечественной конференции, 8 патентов на изобретение.

Структура и объём диссертации: введение, 3 главы, заключение, список литературы из 93 наим. и приложение (акты внедрения и патенты), всего 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.

Ряд результатов получен совместно с соавторами публикаций. В статьях [1, 2] автору принадлежит основной вклад, сделанный под научным руководством Т.Р. Газизова. В работах [3–6, 8, 10, 11] автором выполнялись моделирование и анализ результатов. В работе [9] автором представлен новый способ трёхкратного резервирования и проведен анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации. В патентах [15–20] автор прорабатывал практическую реализуемость предлагаемых решений. В патенте [21] автор предложил один из существенных признаков, а в [22] основную идею изобретения.

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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1 Обзор проблемы повышения надежности и обеспечения ЭМС**

Из раздела 1 следует, что особую актуальность имеют задачи повышения надежности и обеспечения ЭМС РЭА. Рассмотрены резервирование, способы повышения помехоустойчивости и модальная фильтрация. Между тем в приведенных обзорах и исследованиях не обсуждается 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. Представлены цель и задачи работы.

### **2 Способы модального резервирования**

#### **2.1 Суть способов**

Используя модальную фильтрацию 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, новизна которых подтверждена патентами на изобретения, можно добиться уменьшения восприимчивости рассматриваемых цепей к внешним кондуктивным эмиссиям и уровня

кондуктивных эмиссий от этих цепей. В случае выхода из строя резервируемой цепи и переключения на резервную в ней будет получен 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 модалым 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, когда добавлены две дополнительные резервные цепи, воздействующий сигнал разлагается не на 2 моды (четную и нечетную), а на 4. 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 которых 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. Наблюдалось обусловленное разностью задержек мод в структуре разложение импульсной помехи на импульсы меньшей амплитуды, позволяющее уменьшить восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям. При гармоническом воздействии с ЭДС 2 В на частотной зависимости выходного напряжения наблюдалось ослабление исходного сигнала, вплоть до нуля, на определенных частотах, позволяющее значительно ослабить помеховые сигналы в определенном частотном диапазоне.

## **2.2 Однократное резервирование**

Предложен способ 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.

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы  $V1$  и  $V3$  на рисунке 2.1,б) показали 2 импульса разложения с амплитудами 0,5 В (рисунок 2.2,а), что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Номинал резисторов  $R$  здесь и далее выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. Сравнение частотных откликов предложенной структуры и микрополосковой линии (МПЛ) показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рисунок 2.2,б).

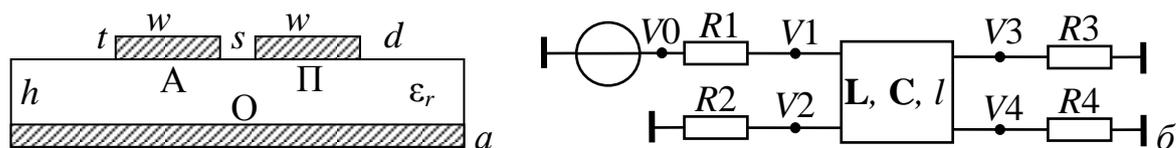


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение структуры связанных линий, проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

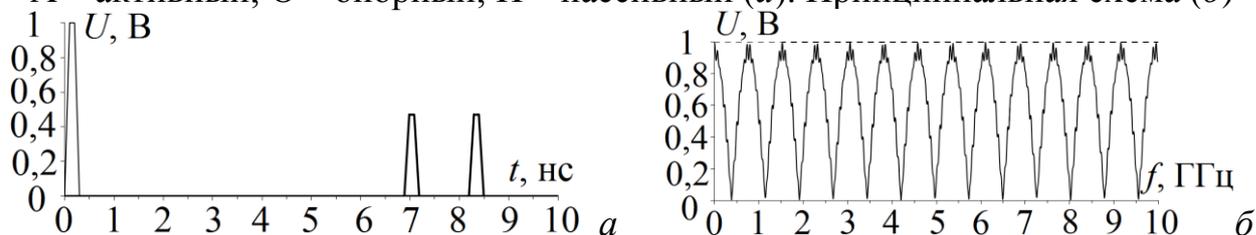


Рисунок 2.2 – Формы напряжения в начале (—) и конце (---) активного проводника структуры (а). Частотные отклики на гармоническое воздействие связанной линии (—) и одиночной МПЛ (---) (б)

Предложен другой способ, отличающийся от предыдущего тем, что зазор между резервируемым и резервным проводниками заполнен диэлектрическим материалом, а его относительная диэлектрическая проницаемость больше, чем у материала подложки печатной платы (рисунок 2.3,а).

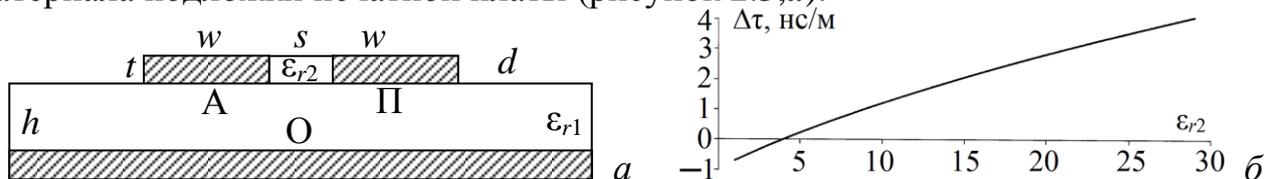


Рисунок 2.3 – Поперечное сечение структуры связанных линий (а).

Зависимость  $\Delta\tau$  от  $\epsilon_{r2}$  при  $\epsilon_{r1}=4,2$  (б)

Результаты моделирования временного и частотного откликов аналогичны показанным на рисунке 2.2. Изменение значения  $\epsilon_{r2}$  (рисунок 2.3,б) 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 дает возможность управлять значениями длительности импульса и частоты гармонического воздействия, для которых возможно модальное разложение.

Предложен способ резервирования для ПП (рисунок 2.4,а). Здесь компоновка и трассировка резервируемой цепи выполняются на верхнем слое подложки (сигнальные проводники выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине), а резервной – на нижнем, зеркально верхнему. При этом резервируемые и резервные сигнальные проводники одноименных цепей располагаются друг под другом, а оставшиеся проводники электрически соединяются между собой. Результаты моделирования аналогичны рисунку 2.2.

Предложен способ компоновки ПП, отличающийся тем, что опорный проводник выполнен в виде отдельных слоев на резервируемой и резервной платах, которые склеиваются слоем диэлектрика с величиной  $\epsilon_{r2}$ , большей чем у диэлектрических подложек резервируемой и резервной плат (рисунок 2.4,б). 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. Разность значений относительной диэлектрической проницаемости подложек плат и слоя диэлектрика влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод ( $\Delta\tau$ ). Результаты моделирования аналогичны рисунку 2.2.

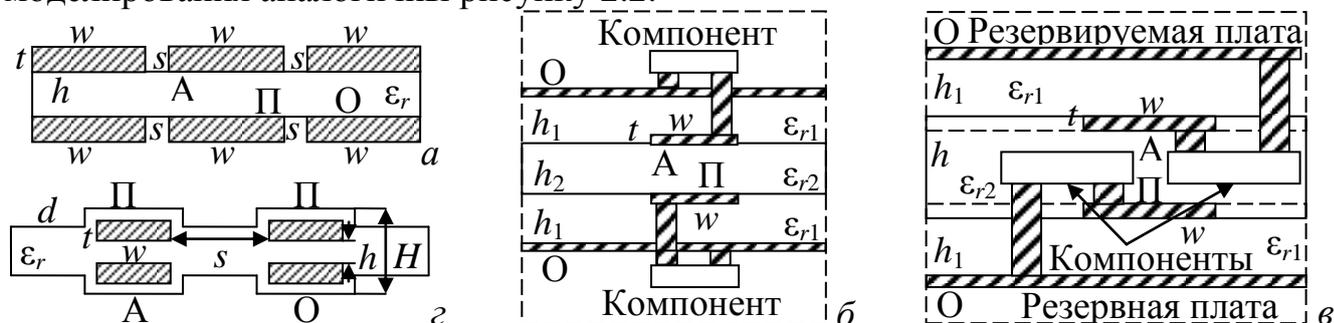


Рисунок 2.4 – Поперечные сечения линии для способов резервирования ПП (*а*), компоновки ПП (*б*), внутренней компоновки (*в*) и плоских кабелей (*г*)

Предложен другой способ компоновки ПП, отличающийся от предыдущего тем, что резервируемые и резервные компоненты размещаются не на внешних, а на внутренних сторонах резервируемой и резервной ПП в слое склеивающего диэлектрика (рисунок 2.4, *в*). Результаты моделирования аналогичны рисунку 2.2.

Предложен способ резервирования плоских кабелей (рисунок 2.4, *г*). 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. Импульсная помеха подавалась между активным и опорным проводниками резервируемой цепи, функцию резервного плоского кабеля выполняют пассивные проводники. Результаты моделирования аналогичны рисунку 2.2.

### 2.3 Трехкратное резервирование

Предложен способ трехкратного резервирования цепей для многослойных печатных плат (рисунок 2.5). Он похож на способ компоновки ПП из раздела 2.2, но отличается тем, что введены еще 2 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.

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 2.5, *б*) показывают 4 импульса разложения с амплитудами 0,12; 0,24; 0,16 и 0,19 В соответственно (рисунок 2.5, *в*), максимальная из которых в 4 раза меньше половины амплитуды воздействующей ЭДС.

Предложен способ трехкратного резервирования межсоединений для двухсторонних ПП (рисунок 2.6). Он похож на способ однократного резервирования для ПП из раздела 2.2, но отличается тем, что каждый сигнальный

проводник делится посредством зазора на 2 одинаковых проводника. При моделировании опорным проводником полагался один из крайних, тогда как 3 остальных крайних 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 2.6,б) показывают импульсы разложения с амплитудами около 0,25 В, т.е. ослабление в 4 раза (рисунок 2.6,в).

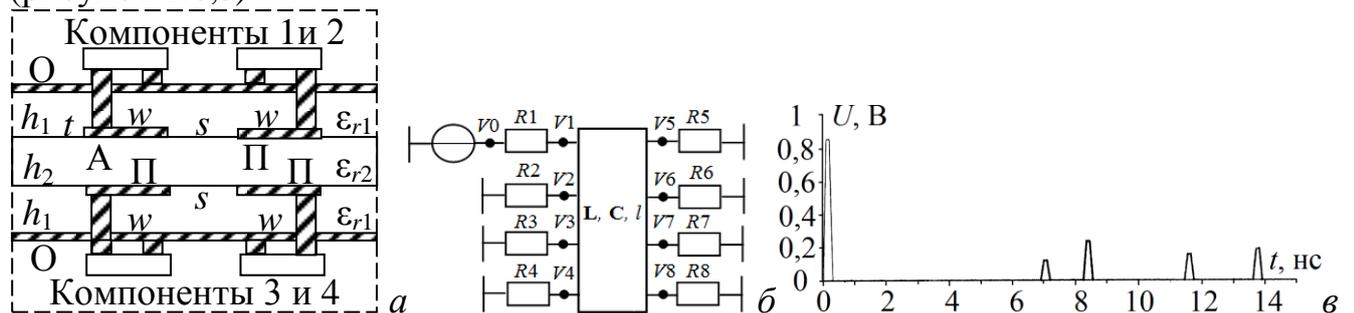


Рисунок 2.5 – Поперечное сечение многослойной ПП (МПП), реализующей способ трехкратного резервирования (а) и схема моделирования (б).

Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника (в)

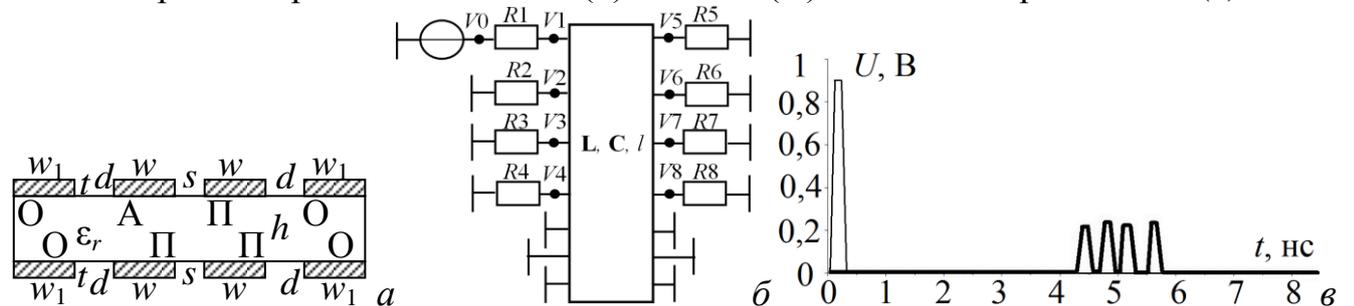


Рисунок 2.6 – Поперечное сечение двухсторонней ПП, реализующей способ трехкратного резервирования (а) и схема моделирования (б).

Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника (в)

## 2.4 Специфика, достоинства и недостатки модального резервирования

В разделе детально описаны специфика, достоинства и недостатки всех предложенных способов МР. Показана их эволюция в виде линий развития:

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 без 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 запатентованный способ компоновки неформованных компонентов. Одно из решений для лучшего размещения компонентов на ПП с МР – это замена дискретных компонентов на специальные компоненты и сборки (рисунок 3.1).

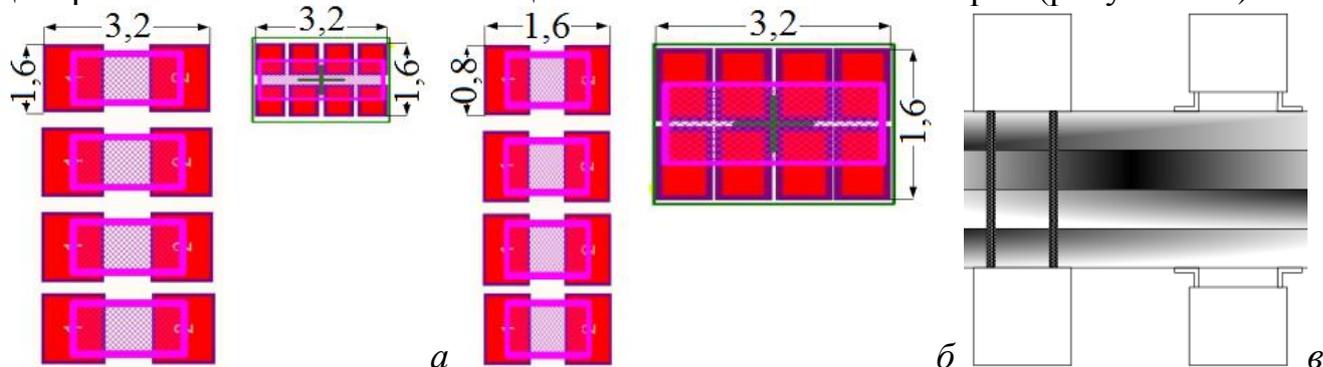


Рисунок 3.1 – Топологические посадочные места дискретного конденсатора и конденсаторной сборки (а), дискретного резистора и резисторной сборки (б).

Сравнение резервирования штыревого и планарного соединителей (в)

Предложен способ компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на ПП для цепей с резервированием, отличающийся 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.



Рисунок 3.2 – Схематичное изображение формовки корпусов радиоэлектронных компонентов и взаимного расположения выводов в прототипе (*а*) и предлагаемом способе (*б*)

При симметричном расположении выводов корпусов радиоэлектронных компонентов относительно слоя диэлектрика, склеивающего резервируемую и резервную платы, одноименные выводы компонентов оказываются друг под другом (рисунок 3.2, *б*). 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.

### 3.2 Модальное резервирование в системе автономной навигации КА

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

Для блока ЦОС (рисунок 3.3, *а*) применялись 2 типа связи: торцевая и лицевая. Введение дополнительных слоев для реализации лицевой связи усложнило структуру ПП, но двухстороннее размещение компонентов на разных сторонах ПП (рисунок 3.3, *б, в*) уменьшило исходные габариты почти в 1,5 раза ( $260 \times 125 \text{ мм}^2$  против  $281 \times 75,5 \text{ мм}^2$ ). Для РПУ (рисунок 3.3, *г*) также применялись 2 типа связи: торцевая и лицевая. Для реализации лицевой МФ на ПП РПУ потребовалось введение дополнительных слоев, что усложнило ПП (рисунок 3.3, *д*), но уменьшило исходные габариты в 2 раза ( $85,3 \times 125 \text{ мм}^2$  против  $64 \times 85,5 \text{ мм}^2$ ). Общая длина на 9 трассах с лицевой МФ составила 122 мм. Для торцевой МФ удалось реализовать только 2 трассы общей длиной 21 мм.

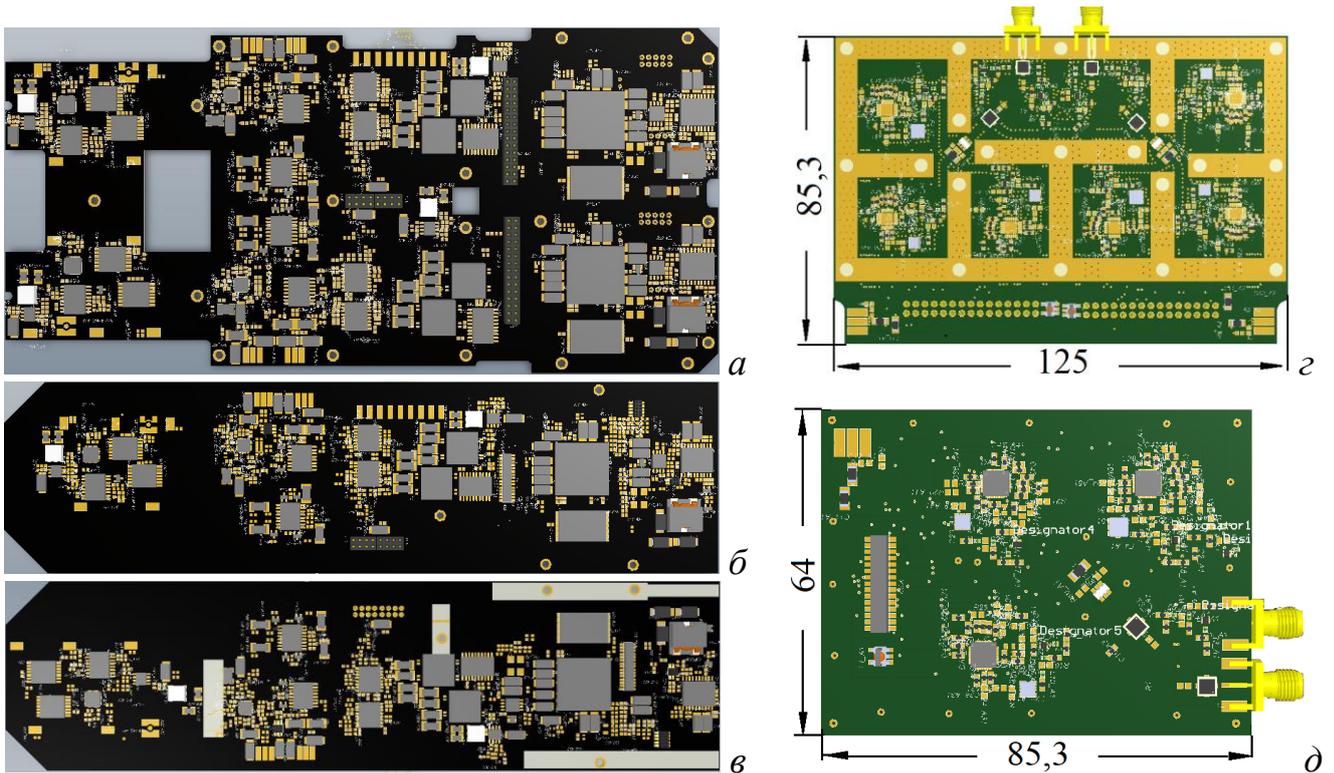


Рисунок 3.3 – Виды ПП: ЦОС сверху без МР (а), сверху (б) и снизу (в) с МР; РПУ без МР (с) и РПУ с МР (д)

Для ИП (рисунок 3.4,а) также применялись два типа связи: торцевая и лицевая. Для лицевой связи введение дополнительных слоев также усложнило ПП, но уменьшило исходные габариты почти в 2 раза ( $57,5 \times 87,5 \text{ мм}^2$  против  $95 \times 87,5 \text{ мм}^2$ ) (рисунок 3.4,б).

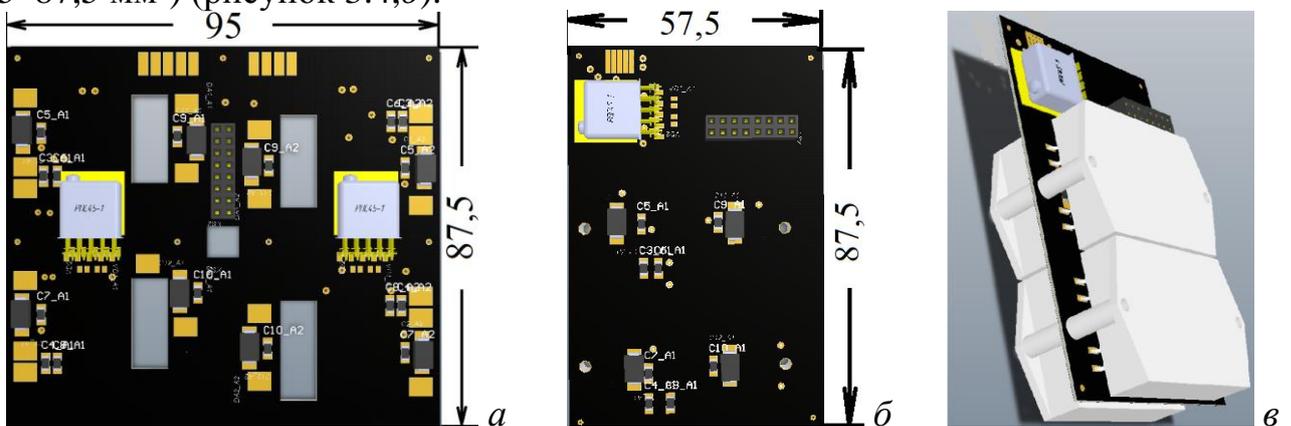


Рисунок 3.4 – Виды ПП ИП: сверху без МР (а), сверху (б) и 3D с МФ (в)

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 модального резервирования

В качестве исследуемых выбраны цепи ПП ЦОС с реализацией МР и без нее. На рисунке 3.5,а показаны вместе формы напряжения выходного сигнала без МР и с МР (при  $\epsilon_{r2}=4,2$  и  $\epsilon_{r2}=10$ ) при напряжении на входе равном половине ЭДС (2,5 В). 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  $\epsilon_r=4,2$ , а выходной сигнал при  $\epsilon_{r2}=4,2$  в 1,5 раза больше чем при  $\epsilon_{r2}=10$  ( $U_{\text{ВЫХ}}=0,65$  В).

Аналогично рассмотрена ПП ИП (рисунок 3.5,б). 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), а выходной сигнал для  $\epsilon_{r2}=4,2$  в 1,5 раза больше, чем для с  $\epsilon_{r2}=10$  ( $U_{\text{ВЫХ}}=1,1$  В).

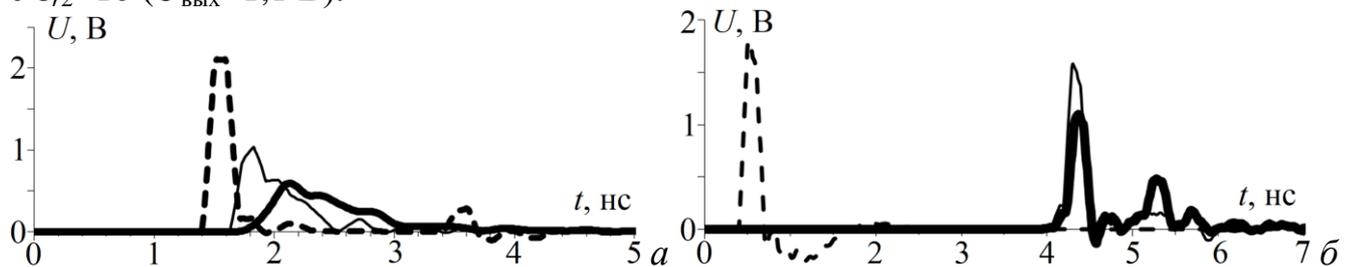


Рисунок 3.5 – Формы напряжения на дальнем конце цепи без МР (- -) и с МР при  $\epsilon_{r2}=4,2$  (—) и  $\epsilon_{r2}=10$  (—) для блока ЦОС (а) и ИП (б)

### 3.4 Экспериментальные исследования модального резервирования

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.

Для изготовления макета выбрана структура МПП, так как модуль разности погонных задержек  $|\Delta\tau|$  в ней может достигать 6,5 нс/м, что при  $l=0,4$  м наглядно покажет модальное разложение сигнала. Выполнена оптимизация с помощью генетического алгоритма (ГА), параметров стека макета МПП под тракт 50 Ом с учетом техпроцессов производства МПП и параметров материалов. В качестве диэлектрика выбран Rogers RO3010 с малой толщиной слоя (130 мкм) и высоким значением  $\epsilon_r=10,2\pm 0,30$ , а в качестве препрега – FR 4 1080.

На рисунке 3.6,а показан вычисленный временной отклик на реальное воздействие с учетом оптимизированных параметров стека МПП при нагрузках на концах линий 50 Ом. Равенство амплитуд импульсов разложения показывает согласованность линий с нагрузками. Структурная схема стека МПП с оптимизированными параметрами показана на рисунке 3.6,б.

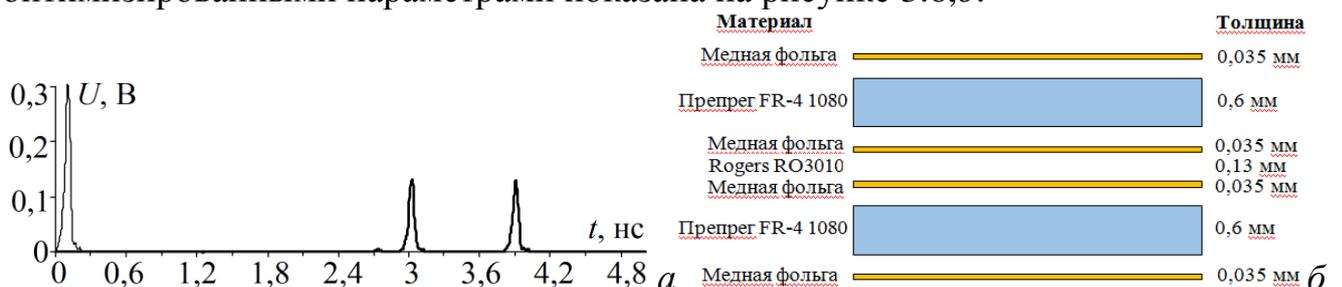


Рисунок 3.6 – Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активной линии (а).  
Стек МПП (общая толщина МПП 1,47 мм) (б)

Виды слоев макета (размеры  $350 \times 200 \text{ мм}^2$ ) приведены на рисунке 3.7.

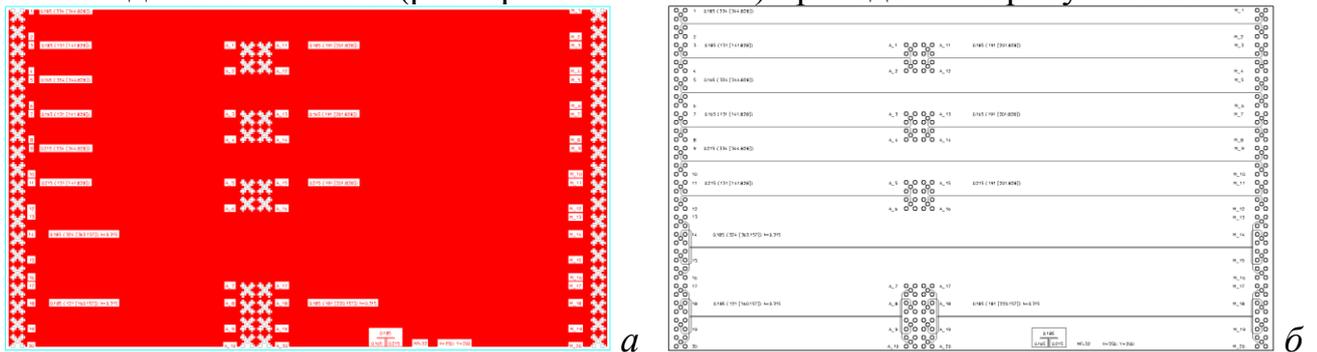


Рисунок 3.7 – Виды слоев макета МПП с МР: «top» (а); «inner1», «inner2» (б)

Для однократного МР на макете реализовано 6 наборов связанных линий. Выбраны три значения ширины трасс ( $w=165, 185, 215 \text{ мкм}$ ) с учетом погрешности техпроцесса. Для каждой ширины выбраны 3 значения длины линии: 141, 185, 334 мм. Проведено электродинамическое моделирование натурального эксперимента с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Моделировались двухпроводная (однократное МР) и четырехпроводная (трехкратное МР) структуры (рисунки 3.8–3.10).

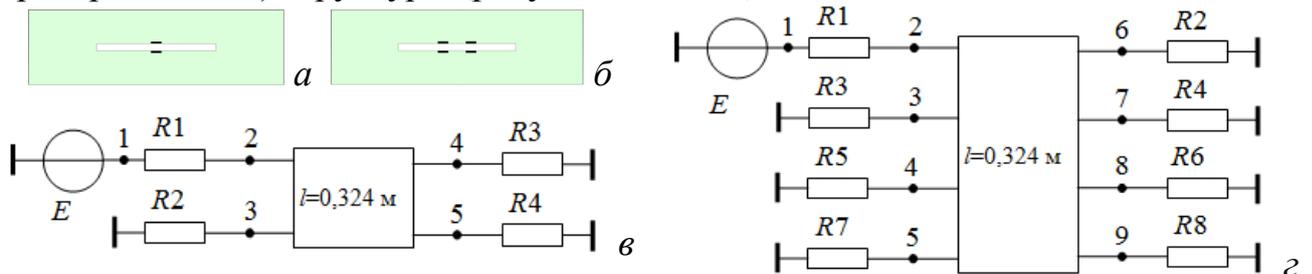


Рисунок 3.8 – Поперечные сечения (а, б) и принципиальные схемы (в, г) двухпроводной и четырехпроводной структур соответственно

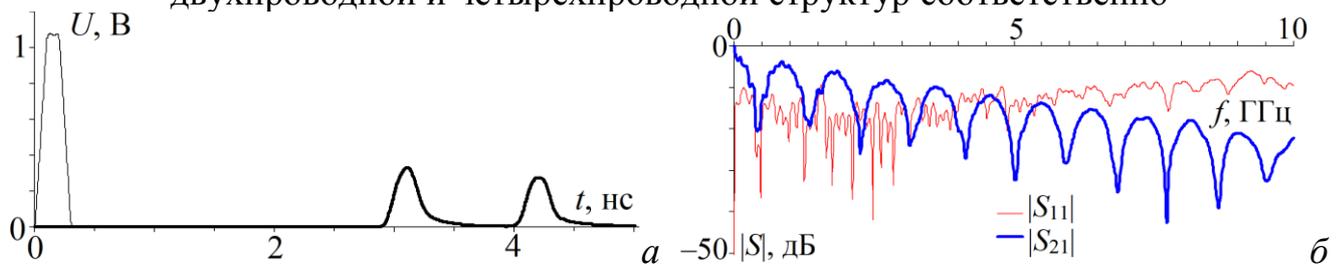


Рисунок 3.9 – Формы напряжения в начале (←) и конце (→) активного проводника (а) и частотные зависимости  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$  (б) двухпроводной структуры

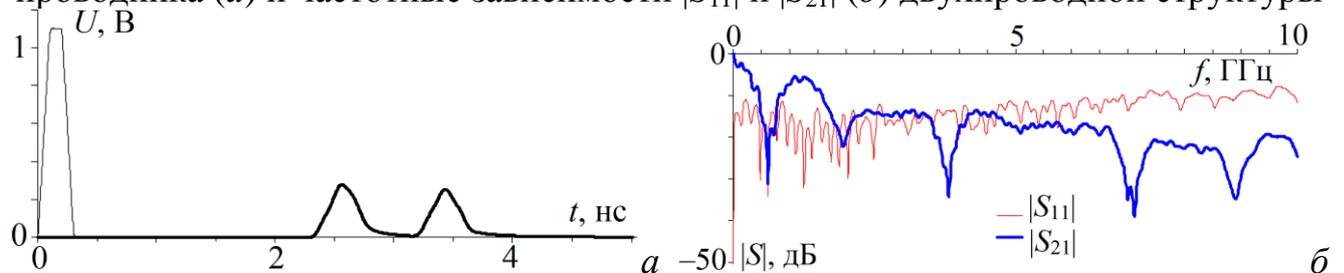


Рисунок 3.10 – Формы напряжения в начале (←) и конце (→) активного проводника (а) и частотные зависимости  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$  (б) четырехпроводной структуры

Получены результаты испытаний макета МПП (рисунок 3.11,а). Измерены частотные зависимости  $|S_{21}|$  и формы напряжения в начале и конце активного

проводника структуры. Фотографии измерений приведены на рисунках 3.11, б, в. Время задержки самого быстрого импульса  $-2,88 \pm 0,22$  нс. Это значение близко к задержке, полученной при моделировании временного отклика – 2,85 нс. Оцифрованные сигналы на выходе формирователя импульса и выходе активного проводника структуры приведены на рисунке 3.12, а.

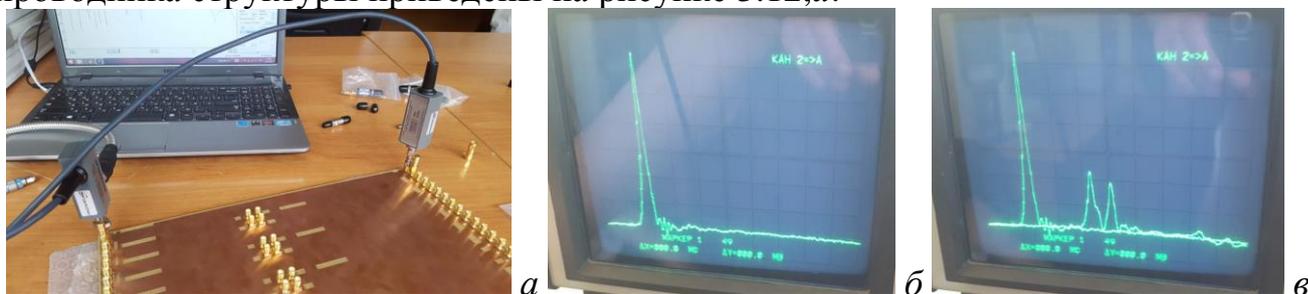


Рисунок 3.11 – Фотография макета (а). Формы напряжения на выходе формирователя (б) и конце активного проводника структуры (в)

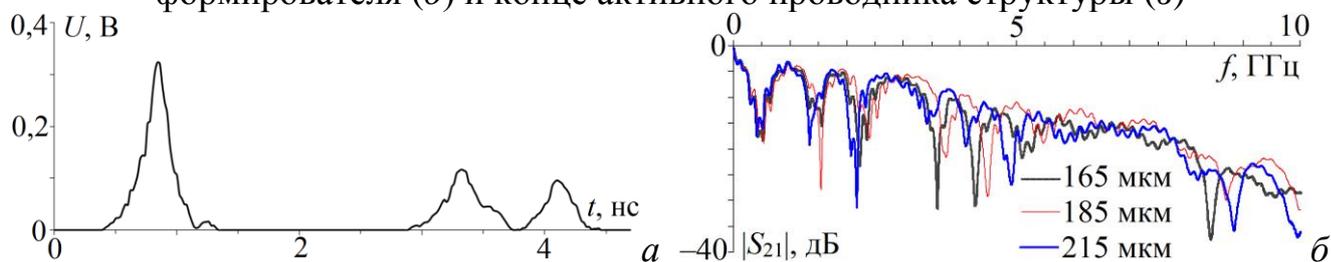


Рисунок 3.12 – Оцифрованные сигналы на выходе формирователя импульса и выходе активного проводника структуры (а). Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при изменении ширины проводника (б)

На рисунке 3.12, б 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 с ослаблением менее 3 дБ составляет примерно 63 МГц для всех значений ширины проводника.

Проведено сравнение вычисленных и измеренных форм напряжения и частотных зависимостей  $|S_{21}|$  (рисунок 3.13). Различие результатов обусловлено неоднородностями межсоединений макета, разбросом геометрических и электрофизических параметров реальной структуры и их отличием от параметров модели, а также частотными характеристиками резисторов и соединителей. Таким образом, натуральный и вычислительный эксперименты на изготовленном макете подтвердили возможность реализации МР.

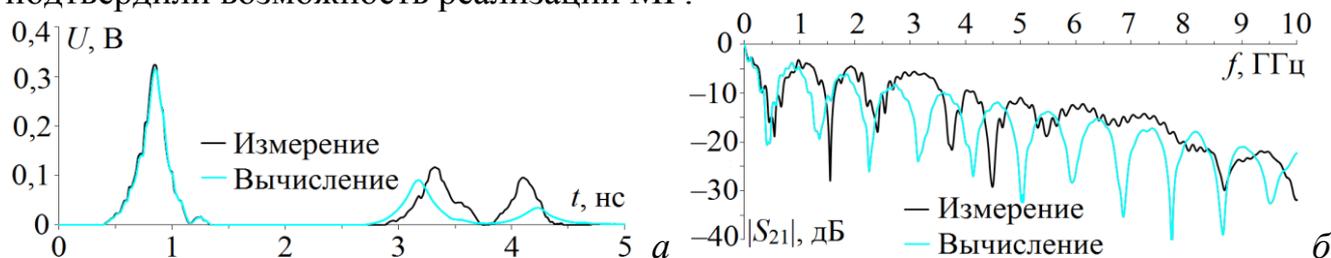


Рисунок 3.13 – Вычисленные и измеренные формы напряжения в конце активного проводника (а) и частотные зависимости  $|S_{21}|$  (б) четырехпроводной структуры

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования. Представлены способы однократного и трехкратного МР, компоновки неформованных компонентов для МР и показана их реализуемость.

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

Перспективы дальнейших исследований. Формулировка принципов компоновки и трассировки цепей с МР с учетом различных видов цепей, топологий, монтажа и структурного уровня. Использование дополнительных импульсов разложения в МР.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. 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.

2. Шарафутдинов В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307.

### Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS

3. 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.

4. Optimization of stack parameters of multi-layer PCB for circuits with redundancy by genetic algorithm / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, 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. 463–467. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109928.

5. Orlov P.E. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system power circuit with modal reservation / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov // 19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2018. – P. 244–249.

6. Methods for increasing noise immunity of radio electronic systems with redundancy / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov, T.R. Gazizov, A.V. Ubaichin // Journal of physics: conference series [Electronic resources]. – 2018. – Vol. 1015, No 5. – P. 1–7.

### **Доклады на отечественных конференциях**

7. Шарафутдинов В.Р. Разработка печатной платы глубинного манометра-термометра / В.Р. Шарафутдинов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2015». – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 1. – С. 138–141.

8. Шарафутдинов В.Р. Модальное резервирование блока цифровой обработки сигналов системы автономной навигации космического аппарата / В.Р. Шарафутдинов, П.Е. Орлов // Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск, 2016. – С. 328–330.

9. Орлов П.Е. Морфологический анализ способов модального резервирования / П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, Е.Н. Буичкин // 22-я Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-22-2016)». – Томск, 2016. – С. 108–112. ISBN 978-5-91191-346-5.

10. Шарафутдинов В.Р. Модальное резервирование радиоприемного устройства системы автономной навигации космического аппарата / В.Р. Шарафутдинов, П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред. В.Н. Бондаренко; отв. за вып. А.А. Левицкий. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 117–119.

11. Шарафутдинов В.Р. Модальное резервирование источника питания системы автономной навигации космического аппарата / В.Р. Шарафутдинов, П.Е. Орлов // 23-я Междунар. 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.

12. Шарафутдинов В.Р. Разработка перспективных устройств с учетом электромагнитной совместимости / В.Р. Шарафутдинов // Материалы XIV междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018. – С. 323–328.

### **Тезисы доклада на отечественной конференции**

13. Орлов П.Е. Компоновка и трассировка электрических соединений при обеспечении электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры: обзор / П.Е. Орлов, А.В. Медведев, В.Р. Шарафутдинов // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–13 апреля, 2018. – С. 76–78.

14. В.Р. Шарафутдинов Конструирование канала управления моментом двигателя-маховика / А.А. Васильцов, В.Р. Шарафутдинов // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–13 апреля, 2018. – С. 67–70.

### **Патенты на изобретение**

15. 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: 10.07.2016 Бюл. №19.

16. 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: 10.07.2016 Бюл. №19.

17. 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: 10.07.2016 Бюл. №19.

18. 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: 10.07.2016 Бюл. №19.

19. 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.

20. 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

21. 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.

22. 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.