

На правах рукописи



Медведев Артём Викторович

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

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

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

Научный руководитель – **Газизов Тальгат Рашитович**,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой телевидения и управления, ТУСУР

Официальные оппоненты – **Увайсов Сайгид Увайсович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования и
производства радиоэлектронных средств
ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский
технологический университет», г. Москва;

Муравьев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
г. Томск

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», г. Воронеж

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/em5roygi>

Автореферат разослан «___» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) подвержена сбоям и отказам, вызванным электромагнитными помехами (ЭМП). Следующие причины делают РЭА менее устойчивой к ЭМП: уменьшение минимального размера компонента для увеличения плотности монтажа, снижение напряжения питания для уменьшения энергопотребления и рассеивания тепла, более жесткая электромагнитная обстановка из-за увеличения количества и мощности устройств, создающих ЭМП. Опасны кондуктивные сверхширокополосные (СШП) помехи, которые имеют высокую амплитуду, малую длительность и широкий спектр. Функциональная безопасность (ФБ) РЭА при воздействии ЭМП, в частности, СШП помех, крайне важна. Поэтому, необходимы подходы, при которых методы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) интегрированы в конструкцию РЭА, схемотехнику электронных схем и электронную компонентную базу и связаны с методами обеспечения ФБ.

Степень разработанности темы. Ряд публикаций последних лет посвящен вопросам обеспечения ФБ РЭА при воздействии ЭМП. Известными зарубежными исследователями в этой области являются Armstrong E.K., Borgeest K., Pissoort D. и Boydens J. Этими вопросами занимаются также российские исследователи: Абрамешин А.Е., Акбашев Б.Б., Аполлонский С.М., Гизатуллин З.М. и Кечиев Л.Н. Методология достижения ФБ электрических и электронных систем, включая учёт ЭМС, описана в стандартах, переведенных на русский язык, серии ИЕС/ТС 61000. В зарубежном стандарте IEEE P1848/D7 представлены практические методы и меры по управлению ФБ, связанные с ЭМП. Группа под руководством Газизова Т.Р. разработала технологию модального резервирования – подход к компоновке и трассировке резервируемых проводников одноименных цепей с холодным резервированием печатных плат (ПП) для ослабления влияния ЭМП малой длительности. Это достигается за счет такого выполнения резервирования, при котором резервируемая и резервные цепи образуют модальный фильтр (МФ) – устройство, позволяющее путем применения связанных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением делить СШП импульс на импульсы меньшей амплитуды из-за различия задержек мод. Ранее разработаны и исследованы способы однократного МР для ПП с однослойной трассировкой проводников, когда под резервируемые и резервные проводники отдается один слой (общий или отдельный для резервируемых цепей). МР в своих диссертациях рассматривали Жечев Е.С., Самойличенко М.А., Черникова Е.Б., Шарафутдинов В.Р. Следующим шагом в исследовании структур с МР является учет отказов их элементов.

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

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

1. Исследовать характеристики структур с однократным МР с однослойной трассировкой до и после отказов их элементов.

2. Разработать новые способы однократного МР с двуслойной трассировкой.

3. Разработать и исследовать способ двукратного МР.

4. Исследовать характеристики структур с трехкратным МР до и после отказов их элементов.

Научная новизна

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

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

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

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

Теоретическая значимость

1. Изучены особенности влияния параметров поперечного сечения на временные и частотные отклики структур с однократным модальным резервированием.

2. Показано преимущество проектирования печатных плат на основе новых способов двуслойной трассировки перед способами однослойной трассировки.

3. Приведены оценки ослабления сверхширокополосных помех в структурах с однократным и трехкратным модальным резервированием.

Практическая значимость

1. Разработаны прототипы с трассировкой проводников с боковой связью на специальных измерительных печатных платах для исследования на излучаемые эмиссии и восприимчивость к излучениям.

2. Внедрены результаты квазистатического моделирования распространения сверхкороткого импульса в цепях блока цифровой обработки сигнала и в цепях источника питания системы автономной навигации космического аппарата в АО «ИСС», г. Железногорск (акт внедрения).

3. Получены 8 патентов на изобретения (способы).

Методология и методы исследования. Использованы компьютерное моделирование методами моментов и конечных разностей во временной области, квазистатический и электродинамический подходы, параметрическая

оптимизация эвристическим поиском, а также лабораторный эксперимент на базе векторного анализатора цепей.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенные три новых способа компоновки и трассировки цепей с модальным резервированием позволяют выполнить их трассировку на двух слоях печатной платы и уменьшить амплитуду распространяющегося сверхширокополосного импульса в цепях с модальным резервированием не менее чем в 2 раза.

2. Предложенный способ двукратного модального резервирования позволяет уменьшить амплитуду распространяющегося сверхширокополосного импульса до отказов в 1,7 раза, после первого отказа – в 2 раза, а второго – в 2,1 раза.

3. После отказов элементов в структуре с трехкратным модальным резервированием, порядок переключения проводников, оптимальный по критерию минимального напряжения на выходе, позволяет увеличение ослабления импульса помехи за счет её разложения: для структуры с опорными проводниками в виде боковых полигонов – до 21% после первого отказа и 13% после второго.

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

Достоверность результатов основана на корректном применении теории многопроводных линий передачи, согласованности результатов моделирования и эксперимента, современных методиках измерения поверенными приборами.

Использование результатов исследований

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

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

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

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

5. НИР «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры,

работающей в экстремальных условиях», проект FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.

Апробация результатов. Результаты позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: РФ (гранты 19-19-00424, 20-19-00446, в т.ч. на их продолжение); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2022 г.; на назначение стипендий Президента и Правительства РФ в 2022–2023 гг. Результаты докладывались и представлялись в материалах: Межд. научно-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», 2018, 2019, 2022, 2023 г.; Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 2019 г.; Межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2019, 2020, 2022 г.; Межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2020, 2023 г.; Int. multi-conference on engineering, computer and information sciences, Новосибирск, 2017, 2019 г.; Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices, Алтай, 2021 г.; Dynamics of systems, mechanisms and machines, Омск, 2021 г.; Ural symp. on biomedical engineering, radioelectronics and information technology, Екатеринбург, 2021 г.; Int. ural conf. on electrical power engineering, Магнитогорск, 2022 г.

Публикации. Опубликовано 48 работ (9 без соавторов): 4 статьи в журналах из перечня ВАК; 4 статьи в журналах из Q1 и Q2 WoS и SCOPUS; 7 статей в других журналах, индексируемых в WoS и SCOPUS; 8 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и SCOPUS; 17 докладов в трудах других конференций; 8 патентов на изобретение.

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обеспечение помехозащищенности резервируемых систем: обзор

В подразделе 1.1 показана актуальность обеспечения ФБ РЭА при воздействии ЭМП, приведены причины отказов элементов ПП, затем рассмотрены методы и меры по устранению рисков для ФБ, связанных с ЭМП. **В подразделе 1.2** выполнен обзор способов одно- и трёхкратного МР. **В подразделе 1.3** приведены подходы к исследованию временных и частотных характеристик ПП. **В подразделе 1.4** сформулированы цель и задачи работы.

2. Однократное модальное резервирование

В подразделе 2.1 представлены результаты исследований характеристик структур с однократным МР с однослойной трассировкой (рисунок 2.1) до и после отказов их элементов во временной и частотной областях.

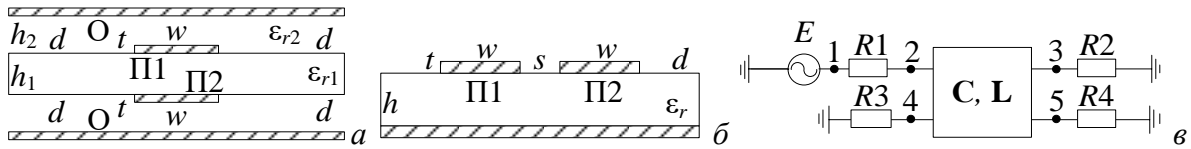


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения с лицевой (а) и боковой (б) связями и эквивалентная схема (в) структур с МР

Для рисунка 2.1а исследованы 3 прототипа ПП с длинами 141, 185 и 334 мм, и параметрами: $h_1=130$ мкм, $h_2=600$ мкм, $w=185$ мкм, $d=555$ мкм, $\epsilon_{r1}=11,2$, $\epsilon_{r2}=4,3$. На концах пассивных проводников задавались сопротивления 50 Ом, а после различных вариантов отказа 1 МОм – холостой ход (ХХ) и 1 мкОм – короткое замыкание (КЗ). На рисунке 2.2 приведены измеренные зависимости $|S_{21}|$ от частоты. Также приведены вычисленные значения первой частоты резонанса (f_0).

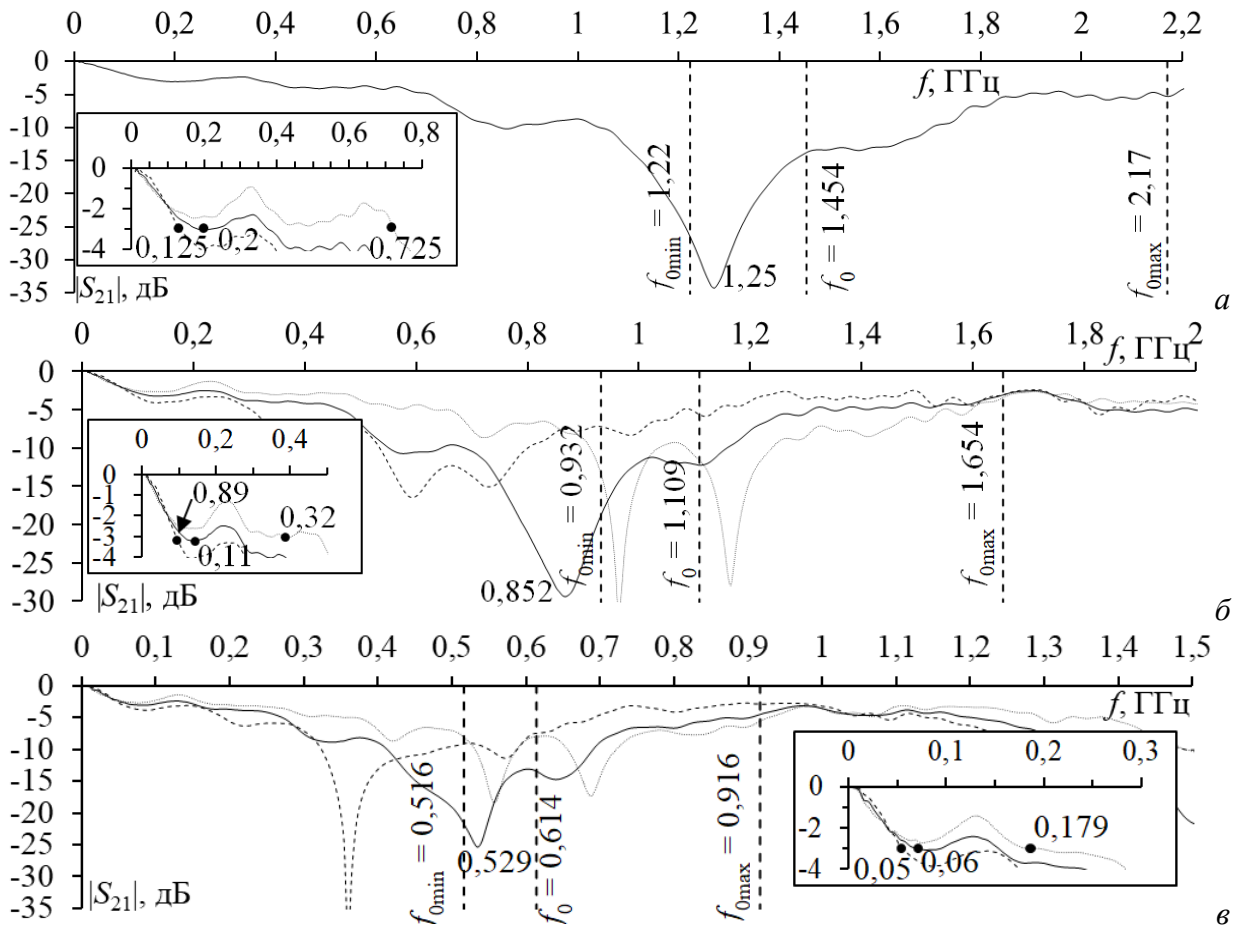


Рисунок 2.2 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ структуры с МР, при $R_4=50$ Ом (—), КЗ (- -) и ХХ (-) и длинах структуры 0,141 (а), 0,185 (б), 0,334 (в) м; расчетные f_0 (- -)

Видно, что вычисленные f_0 отличаются от измеренных для длин 0,141, 0,185 и 0,334 м, на 7,4, 13 и 7,4 %, соответственно. Возможная из причин отличия в том, что у реальной ПП значения параметров могут отличаться от номинальных (по фотошаблону). Производителями материалов и ПП установлены допуски, в пределах которых параметр может изменяться. Для оценки изменения расчётного f_0 с разбросом параметров при производстве ПП, перебраны минимальные и максимальные допустимые значения параметров. Найдены их наборы, когда f_0 будет минимальным ($f_{0\text{мин}}$) и максимальным ($f_{0\text{макс}}$).

Оказалось, что значения f_0 для длин 0,141, 0,185 и 0,334 м могут изменяться от 1,22 до 2,17 ГГц, от 0,932 до 1,654 ГГц и от 0,516 до 0,916 ГГц, соответственно.

Частотные зависимости после отказов сильно искажаются из-за отражений, вызванных тем, что структура больше рассогласуется после отказов. Значение f_0 может изменяться от 2 до 20% в зависимости от длины и типа отказа, а частота среза (f_{cp}) после отказов также сдвигается и может уменьшаться для ЛП с длинами 0,141, 0,185 и 0,334 м на 23, 10,5 и 11,5% относительно случая до отказа, соответственно. Показано, что f_{cp} с ростом длины от 0,141 до 0,334 м уменьшается от 0,125 до 0,05 ГГц.

Для рисунка 2.1б разработаны прототипы с боковой связью, на специальных измерительных ПП для исследования на излучаемые эмиссии и восприимчивость к излучениям. Значения параметров: $w=200$ мкм, $s=175$ мкм, $t=35$ мкм, $h=254$ мкм, $\epsilon_r=10,2$. Верхние слои прототипов без ($w=290$ мкм по всей длине линии) и с МР представлены на рисунке 2.3. Размеры ПП 98×98 мм. Длина связанной линии составляет 7 см, а отвода до SMA соединителя – 0,78 см ($w=290$ мкм по длине отвода).

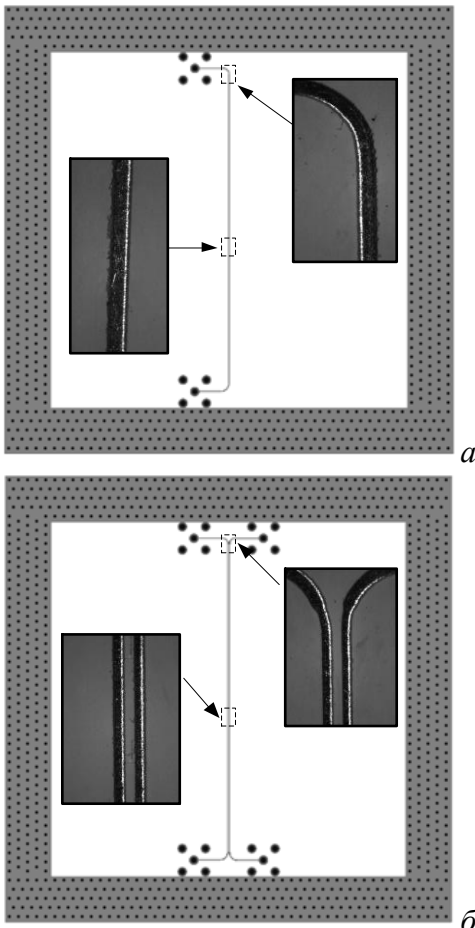


Рисунок 2.3 – Верхний слой ПП без (а) и с (б) МР

На рисунке 2.4 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ до и после отказов, измеренные в диапазоне частот от 10 МГц до 20 ГГц, и отдельно эти же зависимости до 10 ГГц, с f_{cp} для структур без и с МР до и после отказа. Видно, что для структуры с МР до отказов (при $R4=50$ Ом на рисунке 2.1б) $f_0=5,8$ ГГц. После отказа типа КЗ или ХХ при $R4=КЗ$ и $R4=ХХ$ $f_0=4,6$ ГГц. Для структуры без МР f_0 не наблюдается. На рисунке 2.1б видно, что без МР $f_{cp}=7,8$ ГГц, а с МР при $R4=50$ Ом (до отказов) $f_{cp}=2,5$ ГГц. После отказа типа КЗ или ХХ f_{cp} изменяется: при $R4=КЗ$ $f_{cp}=2$ ГГц, а при $R4=ХХ$ $f_{cp}=2,48$ ГГц. При этом в полосе пропускания после отказа наблюдаются резонансы из-за отражений. Таким образом, f_{cp} для ХХ и КЗ на одном конце пассивного проводника отличаются от цепи до отказов на 0,04 и 11%, соответственно, а f_0 – на 11,5%.

В подразделе 2.2 предложены способы двуслойной трассировки – под резервируемые и резервные проводники отдаются два слоя (общие или отдельные для резервируемых цепей). На рисунке 2.5 представлен способ двуслойной трассировки резервированных цепей с боковой связью на противоположных сторонах ПП (способ 1). Он отличается от рисунка 2.1б тем, что резервируемые и резервные проводники одноименных цепей проходят на противоположную сторону ПП, через переходные отверстия.

На рисунке 2.7 представлен способ экранированной двуслойной трассировки резервированных цепей с лицевой связью (способ 2). Он отличается от рисунка 2.1а тем, что каждая из резервируемой и резервной ПП выполнена из двух слоев диэлектрика, на внешнем и внутреннем слоях которых трассируются отрезки резервируемого и резервного проводников, а при склеивании резервируемой и резервной ПП образуются отрезки связанных линий. При этом проводники на внешнем и внутреннем слоях соединены переходными отверстиями.

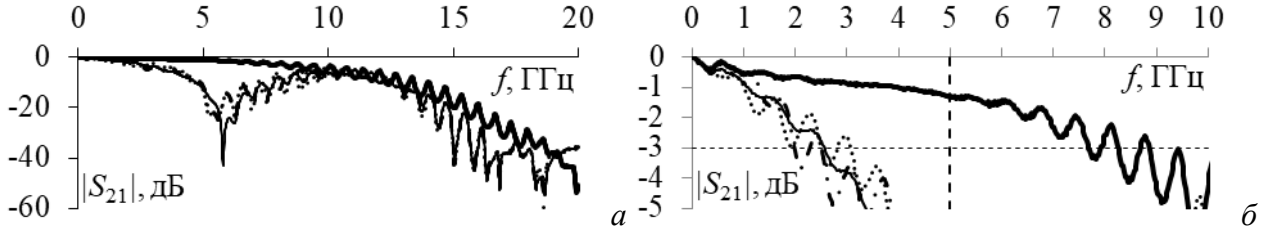


Рисунок 2.4 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ до 20 (а) и 10 (б) ГГц структуры без (—) и с МР, при $R_4=50$ Ом (—), КЗ (- · -) и ХХ (····)

На рисунках 2.6 и 2.8 представлен способ двуслойной трассировки резервированных цепей с боковой связью в двуслойном диэлектрике (способ 3). Он отличается от рисунка 2.1б тем, что ПП образована двумя слоями диэлектрика, на внешней стороне одного из которых и между которыми трассируются пары отрезков резервируемого и резервного проводников, отрезки резервируемого и резервного проводников, расположенные на внешнем и во внутреннем слоях ПП, образуют структуру связанных линий. При этом проводники слоев соединены переходными отверстиями.

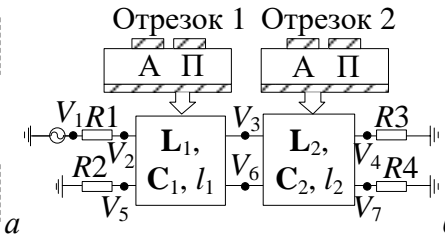
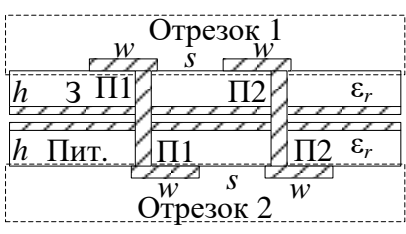


Рисунок 2.5 – Способ 1 (а), сечения и схема (б)

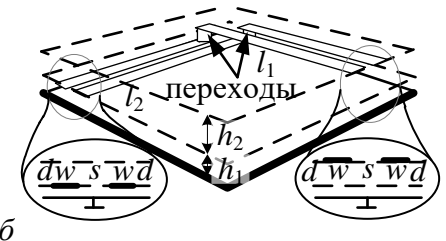


Рисунок 2.6 – Способ 3

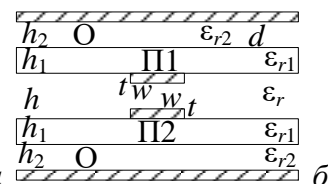
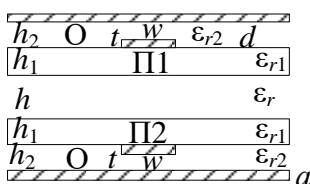


Рисунок 2.7 – Способ 2 с проводниками на внешних (а) и внутренних (б) слоях

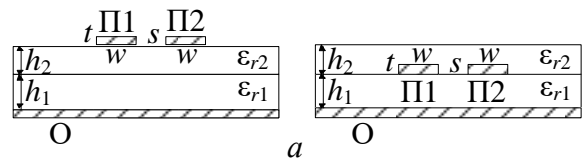


Рисунок 2.8 – Способ 3 с проводниками на внешних (а) и внутренних (б) слоях

Оптимизировались параметры сечений для способов 1 и 2, эвристическим поиском по критериям минимизации $U_{\text{макс}}$, максимизации $\Delta t_{\text{мин}}$ и согласования с трактом 50 Ом. Оптимальные параметры: для способа 1 $h=510$ мкм, $s=100$ мкм, $w=650$ мкм, $t=105$ мкм, $\epsilon_r=4,3$; для способа 2 $h=600$ мкм, $h_1=130$ мкм, $h_2=130$ мкм, $t=35$ мкм, $w=185$ мкм, $d=555$ мкм, $\epsilon_r=4,3$, $\epsilon_{r1}=10,2$, $\epsilon_{r2}=10,2$. Оптимизация дала ослабление СШП импульса для всех структур примерно 2 раза относительно ближнего конца, при разности задержек 2 и 5 нс, соответственно. На вход структур (рисунок 2.8), соединённых последовательно,

как на рисунке 2.5б, подавался СШП импульс с ЭДС 1 В и общей длительностью 300 пс. На рисунке 2.9 сравнены результаты моделирования в TALGAT и ADS с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Формы напряжения представлены для соотношений длин структур $l_1/(l_1+l_2)=0,1, 0,3, 0,9$. Максимальное различие $U_{\text{макс}}$ 3% показывает хорошую согласованность.

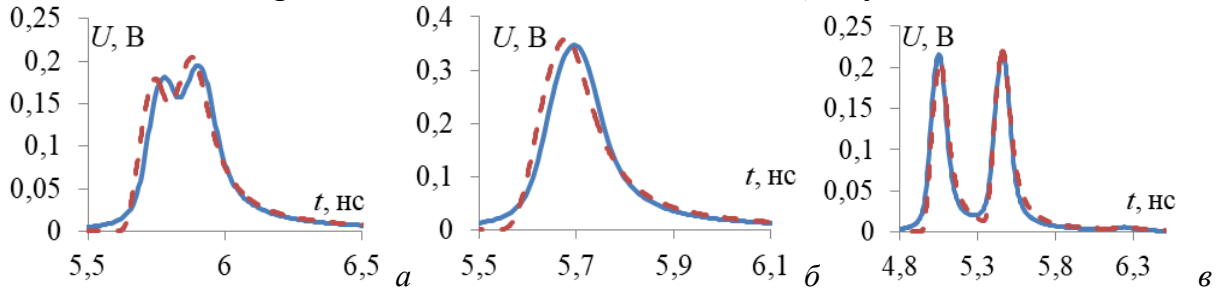


Рисунок 2.9 – $U(t)$ на выходе структуры в TALGAT (—) и ADS (- -) при $l_1/(l_1+l_2)=0,1$ (а), 0,3 (б), 0,9 (в)

3. Двукратное модальное резервирование

В подразделе 3.1 представлен способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием

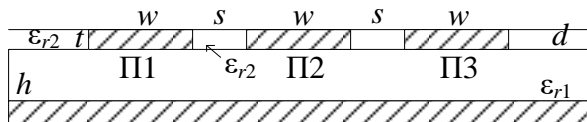


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение структуры с двукратным МР

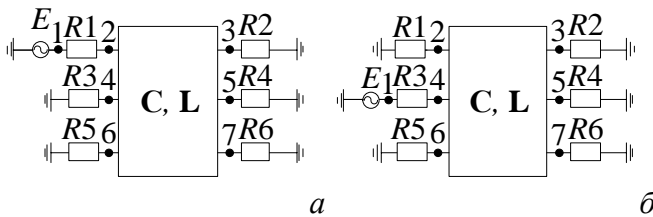


Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема структуры с двукратным МР при крайнем (а) и среднем (б) активных проводниках

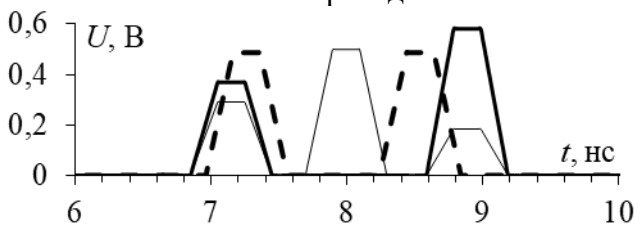


Рисунок 3.3 – $U(t)$ на выходе структуры при крайнем (—) и среднем (—) активных проводниках в сравнении с двухпроводной (- -)

(рисунок 3.1). Он отличается от рисунка 2.1б тем, что введен дополнительный резервный проводник П3 на таком же расстоянии, как между проводниками П1 и П2, а резервируемым выбирается средний проводник. Параметры: $w=185$ мкм, $t=36$ мкм, $d=555$ мкм, $s=185$ мкм, $h=200$ мкм, $\epsilon_{r1}=4$, $\epsilon_{r2}=30$, $l=1$ м. На вход структуры (рисунок 3.2) подавался импульс с ЭДС 2 В и общей длительностью 600 пс. На рисунке 3.3 приведены формы напряжения на дальнем конце структуры при крайнем и среднем активных проводниках, при этом $U_{\text{макс}}=0,5, 0,58$ В, соответственно. Задержки мод по отклику 6,85, 7,7, 8,8 нс при крайнем и 6,85, 8,8 нс при среднем активных проводниках.

Таким образом, при среднем активном проводнике амплитуда импульсов на 16% больше, чем при крайнем, но средний импульс, в силу симметрии воздействия, отсутствует, что удваивает максимальную длительность разлагаемого импульса. Амплитуды импульсов разложения на дальнем конце резервируемой цепи для двухпроводной структуры равны по 0,49 В, что на 0,01 и 0,9 В меньше, чем при крайнем и среднем активных проводниках, соответственно.

В подразделе 3.2 исследовано изменение U_{\max} после отказов для структуры с двукратным МР (рисунок 3.4). Для данной структуры оптимален вариант при активном проводнике П2 до отказов (с порядком переключения проводников П2–П1–П3 или П2–П3–П1), так как до отказов $U_{\max}=0,58$ В, U_{\max}

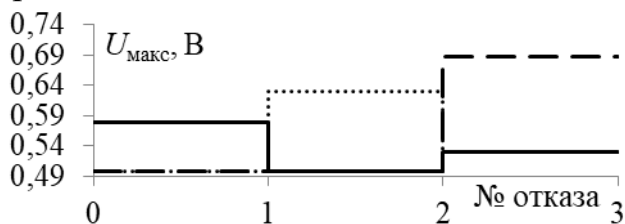


Рисунок 3.4 – U_{\max} (№ отказа) для вариантов 1 (···) и 2 (- -) при резервируемом П1 и варианта (-) при П2 до отказов

после отказов 1 и 2 минимальны из всех вариантов и равны 0,5 В и 0,53 В. Таким образом, предложенный способ позволяет уменьшить амплитуду СШП импульса до отказов в 1,7 раза, после первого отказа – в 2 раза, а второго – в 2,1 раза.

4. Трехкратное модальное резервирование

В подразделе 4.1 представлены 3 структуры (рисунок 4.1). Они симметричны по двум осям в поперечном сечении, так что резервируемым проводником до отказов может быть любой из четырех, а характеристики на дальнем конце будут одинаковы. Представлены схемные модели, имитирующие реальные отказы элементов на концах проводников и вдоль проводников структур с трехкратным МР. Представлена эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР (рисунок 4.2).

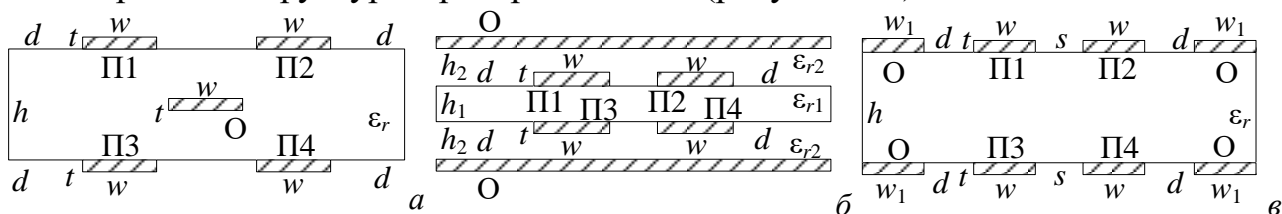


Рисунок 4.1 – Поперечные сечения структур с трехкратным МР

с исполнением опорного проводника в центре (а), сверху и снизу (б), в виде боковых полигонов (в)

В подразделе 4.2 приводится алгоритм анализа структур с трехкратным МР после отказов их элементов на концах и вдоль проводников. Для каждой структуры получены исходные и оптимальные наборы параметров. Далее приведены результаты апробации алгоритма.

1. При опорном проводнике в центре, для обоих наборов оптимален вариант переключения 3, а после всех отказов, минимальные значения U_{\max} (0,262, 0,287, 0,334 В) получены при оптимальном наборе параметров, что делает её наиболее предпочтительной.

До отказов

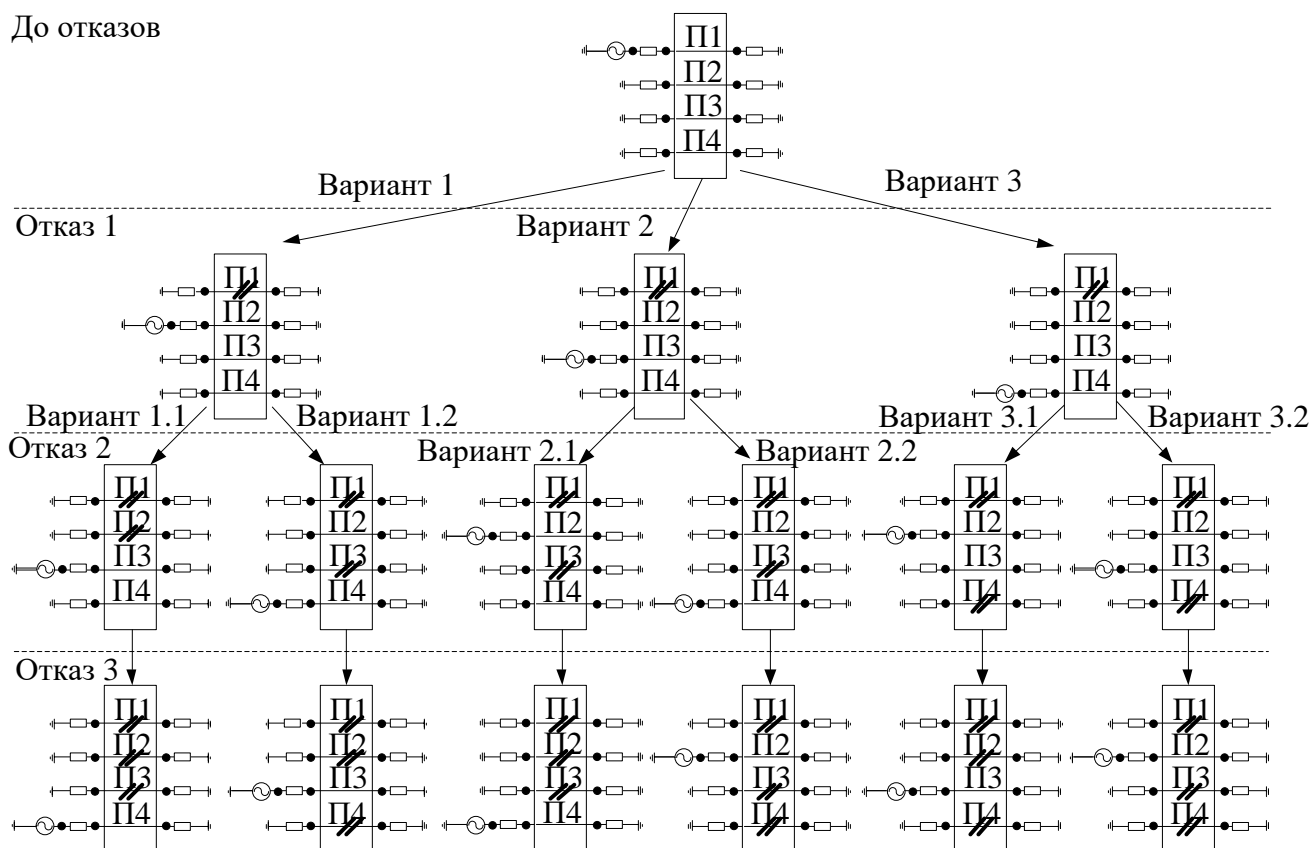
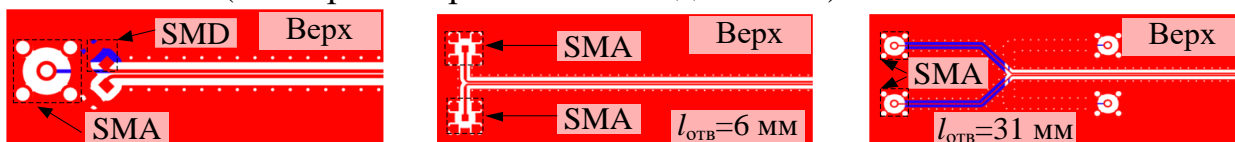


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР

2. При опорном проводнике сверху и снизу, после отказов 1 и 2, минимальные значения $U_{\text{макс}}$ (0,266, 0,289 В) наблюдаются при исходном наборе параметров. Для всех наборов параметров оптимален вариант 3. Более предпочтительным может быть исходный набор параметров с минимальными значениями $U_{\text{макс}}$ (0,266 и 0,289 В) после отказов 1 и 2.

3. При опорном проводнике в виде боковых полигонов при обоих наборах параметров оптимален вариант переключения 3. При оптимальном наборе параметров значение $U_{\text{макс}}$ после отказа 3 при всех вариантах переключения минимально и равно 0,393 В. Однако, если рассматривать отказы 1 и 2, то значения $U_{\text{макс}}$ минимальны для исходного набора параметров и составляют 0,27 и 0,32 В.

В подразделе 4.3 выполнены экспериментальные исследования прототипов ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников сверху и снизу и в центре. С их учетом впервые разработаны прототипы ПП с опорными проводниками в виде боковых полигонов. Оптимальные параметры: $h=254$ мкм, $s=175$ мкм, $w=390$ мкм, $t=35$ мкм, $w_1=2000$ мкм, $d=800$ мкм, $\epsilon_r=10,2$, $l=0,2$ м. Материал подложки – FSD1020T. Разработаны 3 прототипа (рисунок 4.3), отличающихся реализацией и длиной отводов ($l_{\text{отв}}$) до их элементов (SMD-резисторы и SMA-соединители).



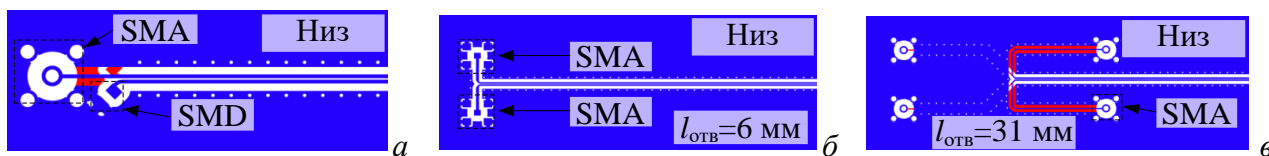


Рисунок 4.3 – Часть ПП сверху и снизу для прототипов 1 (а), 2 (б), 3 (в)

На рисунке 4.4 представлены зависимости $U_{\text{макс}}$ от номера отказа для вариантов переключения 1, 2 и 3 для прототипов 1, 2 и 3. Видно, что для прототипа 1 выбор порядка переключения позволяет увеличить ослабление импульса помехи на 3,9 % после первого отказа и 2,4 % после второго отказа, для прототипа 2 – на 21 % и 13 %, а для прототипа 3 – на 9,3% и 9,8 %, соответственно.

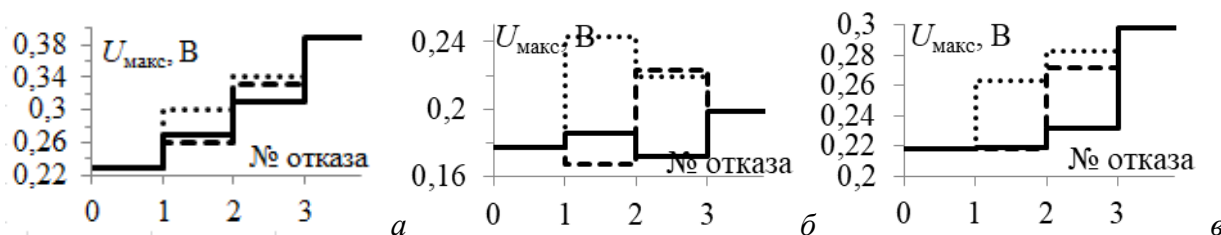


Рисунок 4.4 – $U_{\text{макс}}(\text{№ отказа})$ для вариантов переключения 1 (...), 2(—) и 3(---) для прототипов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований:

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

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

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

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

распространяющегося СШП импульса до отказов уменьшается в 1,7 раза, после первого отказа – в 2 раза, а второго – 2,1 раза.

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

6. Экспериментально исследован прототип ПП с трехкратным МР с исполнением опорных проводников сверху и снизу. До отказов наблюдается ослабление импульса помехи в 6,3 раза. После отказов, на активный проводник влияют отражения от нагрузок на пассивных проводниках, за счет чего выходная амплитуда меняется. Максимальное её увеличение достигает 8% от случая до отказов. В основном, изменения остаются на уровне 1,2% от случая до отказов.

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

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

Рекомендации. Изменяя длину линии и разность погонных задержек мод, можно оптимизировать частоту среза цепи ПП с МР под конкретный цифровой интерфейс. Новые способы МР с двуслойной трассировкой могут использоваться для дальнейших исследований и возможности создания различных конфигураций устройств. Новый способ двукратного МР может использоваться для обеспечения ФБ при воздействии электромагнитных помех. Оптимальный порядок переключения может применяться для ослабления СШП помех в электрических цепях с трёхкратным МР.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка структур с однократным МР под конкретный цифровой интерфейс. Реализация РЭА на основе МР, используя новые способы с двуслойной трассировкой резервируемых проводников. Детальное исследование возможности улучшения характеристик нового способа двукратного МР за счет неодинаковости каналов передачи.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. **Медведев, А.В.** Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов / А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – №4. – С. 59–66.
2. **Медведев, А.В.** Моделирование и экспериментальное исследование четырехпроводной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием при отказах её элементов // Доклады ТУСУР. – 2023. – №1. – С. 48–55.
3. **Медведев, А.В.** Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – №2. – С. 175–203.
4. Морозов, С.Р. Квазистатический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой / С.Р. Морозов, **Медведев А.В.** // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – №3. – С. 91–106.

Статьи в журналах, входящих в Q1/Q2 Scopus

5. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, **A.V. Medvedev**, A.V. Nosov, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2020. – Vol. 12(7), no. 1117. – P. 1–38.
6. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A.O. Belousov, **A.V. Medvedev**, E.B. Chernikova, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13(6), no. 1074. – P. 1–22.
7. **Medvedev, A.V.** Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure / **A.V. Medvedev**, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 64, no. 4. – P. 1171–1181.
8. **Medvedev, A.V.** Experimental study of a structure with triple modal reservation before and after failures / **A.V. Medvedev**, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, no. 1. – P. 360–363.

Публикации в журналах, индексируемых WoS и Scopus

9. Methods for increasing noise immunity of radio electronic systems with redundancy / P.E. Orlov, **A.V. Medvedev**, V.R. Sharafutdinov, T.R. Gazizov, A.V. Ubaichin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 1015(5) – P. 052022.
10. **Medvedev, A.V.** Evaluating modal reservation efficiency before and after failure / **A.V. Medvedev**, T.R. Gazizov, Y.S. Zhechev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488, no 1. – P. 012015.
11. **Medvedev, A.V.** Analysis of frequency characteristics of a structure with single modal reservation before and after failure / **A.V. Medvedev**, Y.S. Zhechev //

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, no 2. – P. 022037.

12. **Medvedev, A.V.** Studying the switching order for a three-wire structure with modal reservation after failures / **A.V. Medvedev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919(2020). – P. 052022.

13. Zhechev, Y.S. Using N -norms for analysing a device with a single modal reservation / Y.S. Zhechev, A.V. Zhecheva, **A.V. Medvedev**, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1611, no 1. – P. 012065.

14. **Medvedev, A.V.** Parametric optimization of double-sided printed circuit board with triple modal reservation accounting failures / **A.V. Medvedev**, T.R. Gazizov // ELECTRICA. – 2023. – Vol. 23, no. 2 – P. 338–344.

15. Zhechev, Y.S. Signal integrity analysis of the structure with single modal reservation before and after failures / Y.S. Zhechev, **A.V. Medvedev**, T.R. Gazizov // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2023. – Vol. 12, no. 1. – P. 69–73.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

16. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system circuit with modal reservation / P.E. Orlov, **A.V. Medvedev**, V.R. Sharafutdinov, I.F. Kalimulin // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) – Novosibirsk, Russia, 18–22 September 2017. – P. 244–249.

17. Orlov, P.E. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system power circuit with modal reservation / P.E. Orlov, **A.V. Medvedev**, V.R. Sharafutdinov // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) – Erlagol, Russia, 29 June–03 July 2018. – P. 244–249.

18. Sharafutdinov, V.R. Using modal reservation for ultrashort pulse attenuation after failure / V.R. Sharafutdinov, **A.V. Medvedev** // Proc. of IEEE 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, Russia, 21–27 October 2019. – P. 1–4.

19. **Medvedev, A.V.** Studying the propagation of an ultrashort pulse in a cable attached to a PCB system with modal reservation // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) – Souzga, Russia, 30 June–04 July 2021 – P. 1–4.

20. Gazizov, R.R. Using portraits of N -norms for large-scale investigation of circuits with modal reservation / R.R. Gazizov, **A.V. Medvedev**, T.R. Gazizov // 2021 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) – Omsk, Russia, 09–11 November 2021 – P. 1–6.

21. **Medvedev, A.V.** Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation / **A.V. Medvedev**, T.R. Gazizov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021 – Yekaterinburg, 13–14 May 2021 – P. 427–430.

22. Kosteletskii, V.P. Method for experimental study of circuits with triple modal reservation in time and frequency domains / V.P. Kosteletskii, **A.V. Medvedev**, Y.S. Zhechev // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, Russia, 23–25 September 2022. – P. 80–85.

23. **Medvedev, A.V.** Interconnect routing on two signal layers of a modal reservation PCB: a case study // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, Russia, 23–25 September 2022. – P. 1–6.

Доклады в трудах отечественных конференций

24. **Медведев, А.В.** Методы повышения помехоустойчивости и надежности энергосистемы космического аппарата: обзор // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018» – Томск, Россия, 16–18 мая 2018. – С. 130–133.

25. **Медведев, А.В.** Исследование меандровой линии на печатной плате с модальным резервированием / **А.В. Медведев**, А.О. Губин // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019» – Томск, Россия, 15–17 Мая 2019. – С. 21–24.

26. **Медведев, А.В.** Ослабление сверхкороткого импульса после отказа при модальном резервировании // XV международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» – Томск, Россия, 20–22 ноября 2019. – С. 38–41.

27. **Медведев, А.В.** Ослабление сверхкороткого импульса после отказа при трехкратном модальном резервировании // 25-я Всероссийская научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС- 2019» – Томск, Россия, 19 ноября 2019. – С. 162–167.

28. Ромашов, И.П. Исследование порядка переключения цепей после отказов типовой структуры с трехкратным модальным резервированием / И.П. Ромашов, **А.В. Медведев** // 26-я Всероссийская научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС- 2020» – Томск, Россия, 24 ноября 2020. – С. 117–122.

29. **Медведев, А.В.** Анализ задержек импульсов разложения в системе кабель–плата с модальным резервированием // Перспективы развития фундаментальных наук. сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, Россия, 21–24 апреля 2020. – С. 78–80.

30. Гребенюк, А.В. Проектирование и изготовление тестовых печатных плат с модальным резервированием/ А.В. Гребенюк, **А.В. Медведев** // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022». – Томск, Россия, 18–20 мая 2022. – Ч. 1. – С. 221–224.

31. Лакоза, А.М. Разработка печатной платы с трехкратным модальным резервированием с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов / А.М. Лакоза, **А.В. Медведев** // Сборник избранных статей международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022». – Томск, Россия, 18–20 мая 2022. – Ч. 1. – С. 224–227.

32. Газизов, Р.Р., **Медведев А.В.**, Газизов Т.Р. Использование портретов N-норм для массового исследования цепей с модальным резервированием /

Р.Р. Газизов, А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – Омск, Россия, 09–11 ноября 2021. – Т. 9, №3. – С. 104–109.

33. **Медведев, А.В.** Анализ защитных характеристик структуры двухслойной печатной платы из различных материалов с трехкратным модальным резервированием / **А.В. Медведев, С.Р. Морозов** // 28-я Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2022» – Томск, Россия, 16 ноября 2022. – С. 126–134.

34. **Медведев, А.В.** Оптимизация структур печатной платы с двухслойным диэлектриком на основе модального резервирования / **А.В. Медведев, С.Р. Морозов** // XXX Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика-2023» – Москва, Россия, 20–21 апреля 2023. – С. 192.

35. Морозов, С.Р. Анализ характеристик структуры печатной платы с проводниками на внутреннем слое с модальным резервированием / С.Р. Морозов, **А.В. Медведев** // XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» – Томск, Россия, 25–28 апреля 2022. – С. 91–93.

36. Морозов, С.Р. Параметрическая и структурная оптимизация генетическим алгоритмом печатной платы с двухслойным диэлектриком / С.Р. Морозов, **А.В. Медведев** // XX Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов – Томск, Россия, 2–5 мая 2023. – С. 28–30.

37. Морозов, С.Р. Характеристики структуры с проводниками на внешнем слое печатной платы с модальным резервированием / С.Р. Морозов, **А.В. Медведев** // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023» – Томск, Россия, 17–19 мая 2023. – С. 49–51.

Тезисы в трудах отечественных конференций

38. **Медведев, А.В.** Влияние щели в плоскости земли на волновое сопротивление многослойной печатной платы с модальным резервированием / **А.В. Медведев, П.Е. Орлов** // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций – Севастополь, Россия, 22–26 октября, 2018. – №1. – С. 198.

39. Орлов, П.Е. Компоновка и трассировка электрических соединений в вопросах обеспечения ЭМС РЭА: обзор / П.Е. Орлов, **А.В. Медведев, В.Р. Шарафутдинов** // Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–3 апреля, 2018. – С. 46–48.

40. **Медведев, А.В.** Исследование распространения сверхкороткого импульса в системе кабель–плата с модальным резервированием // IEEE XXII Международная конференция молодых специалистов в области электронных приборов и материалов (EDM 2021). – Новосибирск, Россия, 30 июня–04 июля, 2021. – С. 172–176.

Патенты

41. Патент РФ на изобретение №2738955. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р., **Медведев А.В.** Способ трехкратного резервирования межсоединений. Заявка №2019138502. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубликовано: 21.12.2020 Бюл. №36.

42. Патент РФ на изобретение №2752232. **Медведев А.В.**, Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двухкратным резервированием. Заявка №2019140181. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубликовано: 23.07.2021 Бюл. №16.

43. Патент РФ на изобретение №2752233. **Медведев А.В.**, Алхадж Хасан А., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников на двухслойной печатной плате для цепей с резервированием. Заявка №2020122274. Приоритет изобретения 06.07.20. Опубликовано: 23.07.2021 Бюл. №21.

44. Патент РФ на изобретение №2754077. **Медведев А.В.**, Алхадж Хасан А., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы. Заявка №2020122269. Приоритет изобретения 06.07.2020. Опубликовано: 26.08.2021 Бюл. №24.

45. Патент РФ на изобретение №2754078. **Медведев А.В.**, Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р. Способ компоновки многослойных печатных плат для цепей с резервированием. Заявка №2020122293. Приоритет изобретения 06.07.20. Опубликовано: 26.08.2021 Бюл. №24.

46. Патент РФ на изобретение №2767190. **Медведев А.В.**, Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Способ переключения цепей с трёхкратным резервированием после отказов. Заявка №2021116338. Приоритет изобретения 07.06.2021. Опубликовано: 16.03.2022 Бюл. №8.

47. Патент РФ на изобретение №2770516. **Медведев А.В.**, Газизов Т.Р. Способ переключения цепей с двукратным резервированием после отказов. Заявка №2021115974. Приоритет изобретения 03.06.2021. Опубликовано: 18.04.2022 Бюл. №11.

48. Патент РФ на изобретение №2779536. **Медведев А.В.**, Газизов Т.Р. Способ трассировки печатных проводников цепей питания с резервированием. Заявка №2021115972. Приоритет изобретения 03.06.21. Опубликовано: 08.09.2022 Бюл. №25.