

На правах рукописи



Заболоцкий Александр Михайлович

Модели, алгоритмы, методики, технологии и устройства
для обеспечения электромагнитной совместимости
бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата

Специальность 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Специальность 05.12.07

Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск – 2016

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

Научный консультант: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Газизов Тальгат Рашитович

Официальные оппоненты: **Майстренко Василий Андреевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск

Хрусталеv Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

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

Ведущая организация: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

Защита состоится 25 октября 2016 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <https://storage.tusur.ru/files/43646/dissertation.pdf> и в библиотеке ФГБОУ ВПО «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан 9 июня 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Массовое проникновение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в самые различные сферы общества, а особенно в управление критичными системами в военной, атомной, транспортной и космической отраслях, сделало общество сильно зависящим от РЭА. Эта зависимость особенно опасна из-за уязвимости РЭА к воздействию электромагнитных помех, поскольку их уровни непрерывно возрастают (с ростом плотности размещения, компоновки и трассировки, а также уровней и частот воздействия), а уровни восприимчивости компонентов снижаются (с уменьшением запаса помехоустойчивости из-за снижения напряжения питания интегральных схем). Всё чаще выявляются ситуации, когда из-за этой зависимости удовлетворительное функционирование РЭА невозможно, что для критичных систем совершенно недопустимо, поскольку связано с риском больших материальных потерь, человеческих жертв и даже катастроф. Поэтому при проектировании РЭА актуально обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС).

Расширяющееся использование космоса делает актуальным обеспечение ЭМС бортовой РЭА космического аппарата (КА). Особое внимание в решении этой проблемы уделяется излучаемым эмиссиям, растущим вследствие постоянного расширения диапазона рабочих частот, что, в свою очередь, приводит к возрастанию требований к испытаниям. В соответствии со стандартами испытания бортовой РЭА КА рекомендуется проводить в диапазонах частот до 1, 18, 40 и даже 100 ГГц. Многие изменения касаются требований к испытаниям и на кондуктивные эмиссии, которые появляются в результате выбросов по цепям питания и других переходных процессов. Не отстает от них и рост требований на пределы восприимчивости к излучениям.

Натурные испытания бортовой РЭА КА на ЭМС и её повторное проектирование из-за несоответствия всё более жестким требованиям ЭМС значительно удорожают и замедляют проектирование, создавая серьезные препятствия для развития космической отрасли. Поэтому при проектировании бортовой РЭА КА всё шире используется моделирование ЭМС инструментами нескольких видов (анализа, методов, моделей, программных продуктов). В линии видов анализа квазистатический занимает центральное место, давая результаты приемлемой точности без больших затрат времени и вычислительных ресурсов. Рост плотности, а значит взаимовлияний, трасс в печатных узлах унифицированных электронных модулей (УЭМ) с переходом к технологиям «система-в-корпусе» и «система-на-кристалле» требует тщательного анализа целостности сигналов и питания их электрических цепей. Для такого анализа пригодны квазистатические модели, которые получили F. Tesche, A. Djordjevic, M. Nakhla. Но для их использования необходимо разработать алгоритмы с учетом специфики бортовой РЭА КА и выполнить их программную реализацию. Переход к негерметичной конструкции КА резко ухудшает в определенных частотных диапазонах эффективность его экранирования и требует особых подходов к моделированию его частей.

Расширение спектра используемых импульсных сигналов, а также сигналов помех, или наличие узкополосных помех высокой частоты, требует моделирования в диапазоне частот до 40 ГГц. Для этого необходимы математические модели, описывающие паразитные параметры пассивных компонентов и учитывающие частотную зависимость параметров диэлектриков. Для корректного моделирования ЭМС необходимы методики. Результаты исследований по моделированию межсоединений печатных плат (ПП) отражены в работах таких специалистов как Л.Н. Кечиев, С.Ф. Чермошенцев, Е.Д. Пожидаев, Ю. Шлепнёв, R. Achar, F. Canavero и др. Исследования в области сверхвысоких частот ведут Н.Д. Малютин, Б.А. Беляев, А.Н. Сычев, Л.И. Бабак и др. Необходимость отечественного программного обеспечения показана в работах Ю.М. Ёлшина.

Повышение срока активного существования КА до 15 лет требует значительно завышенного запаса помехозащищенности, поскольку за этот срок нежелательные электромагнитные воздействия могут возрасти до столь высоких уровней и частот, которые трудно даже спрогнозировать. В недавно вышедшей монографии под редакцией В.Ю. Кирилова отмечена особая актуальность создания новых, более совершенных пассивных методов защиты КА путем улучшения их технологии и использования новых концептуальных принципов. Это возможно за счет выявления новых закономерностей и связей в ходе исследования ПП и кабелей бортовой РЭА КА. Детальное исследование модальных (обусловленных разностью задержек мод поперечных волн в многопроводной линии передачи) явлений в печатных структурах бортовой РЭА позволит выявить скрытые возможности совершенствования ЭМС и сформулировать новые принципы радиационнстойкой помехозащиты без увеличения массы, что особенно важно для КА.

Актуальность совершенствования моделирования и обеспечения ЭМС подтверждается активными исследованиями в этом направлении, причем в разных секторах (академическом, университетском, отраслевом) инженерных наук, известными школами, которыми руководят: В.Е. Фортов (Россия, РАН), Л.Н. Кечиев (Россия, ВШЭ-МГИЭМ), С.А. Сухоруков (Россия, производство), J.L. ter Haseborg (Германия, Гамбургский технологический университет), W. Radasky (США, корпорация, МЭК). Вопросы ЭМС печатных узлов и стойкости полупроводниковых компонентов к воздействию электростатических разрядов, эффективности экранирования (ЭЭ), разработки схем и методов защиты от электромагнитных воздействий, функциональной безопасности бортовых систем отражены в работах Л.Н. Кечиева, Б.Б. Акбашева, Н.В. Балюка, В.Ю. Кирилова, С.Ф. Чермошенцева. Исследования по оценке устойчивости цифровых вычислительных комплексов к воздействию электромагнитных полей и разработке методов и средств оценки влияния электромагнитных импульсов отражены в работах Ю.В. Парфенова, Л.О. Мыровой, С.А. Сухорукова.

Однако ряд важных проблем в обозначенных выше направлениях остается нерешенным и требует новых подходов. Между тем их решение крайне

актуально, особенно для импортозамещения и технологической независимости России в современной обстановке.

Цель работы – разработать модели, алгоритмы, методики, технологии и устройства для обеспечения ЭМС бортовой РЭА КА. Для её достижения необходимо решить следующие задачи: выполнить анализ современного состояния проблемы обеспечения ЭМС бортовой РЭА КА, технологий помехозащиты РЭА, а также методов и средств моделирования печатных узлов; разработать новые модели, алгоритмы и программы для моделирования ЭМС печатных узлов, учитывающие паразитные параметры пассивных электронных компонентов и частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости материалов ПП; разработать методики анализа ЭМС печатных узлов бортовой РЭА; предложить новые технологии для обеспечения ЭМС; разработать общие подходы к созданию новых устройств для помехозащиты РЭА; разработать конструкции устройств для помехозащиты РЭА; выполнить экспериментальные исследования для подтверждения теоретических выводов и показать практическую применимость разработанных устройств для помехозащиты РЭА; внедрить результаты диссертационной работы.

Научная новизна

1. Разработаны модели, алгоритмы и программы для вычисления отклика схемы из отрезков многопроводных линий передачи с RLC-элементами на стыках, учитывающие паразитные параметры пассивных электронных компонентов и частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости материалов.

2. Предложена технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках, основанная на выборе оптимальных параметров проводников и диэлектриков.

3. Предложена технология модальной фильтрации, основанная на уменьшении амплитуды нежелательного сигнала за счет его разложения в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением.

4. Предложена технология модального разложения и восстановления, основанная на явлении разложения сигнала и последующего восстановления его в многоотрезочных структурах многопроводных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением.

5. Созданы новые помехозащитные устройства на основе печатных и кабельных структур, отличающиеся использованием модального разложения нежелательного сигнала.

Теоретическая значимость

1. Получены собственные значения и векторы для различных видов многопроводных линий передачи (МПЛП) ПП и кабелей бортовой РЭА КА, форм и числа их проводников, значений параметров их проводников и диэлектриков.

2. Для ПП и кабелей бортовой РЭА КА выполнено теоретическое обоснование возможностей: уменьшения взаимовлияний проводников; интегрированной защиты от сверхкоротких импульсов (СКИ) делением на

импульсы меньшей амплитуды за счет разности задержек мод структуры; разложения и последующего восстановления сигналов.

3. Доказана достаточность вычисления лишь собственных значений и векторов (без вычисления отклика) для обоснования ряда выводов.

4. Сформулированы условия: прохождения импульса через виток линии задержки без искажений его формы; минимизации модальных искажений; разложения и восстановления импульсного сигнала в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением.

5. Получены выражения для вычисления амплитуд импульсов разложения в согласованном отрезке МПЛП и коэффициента ослабления многокаскадного модального фильтра (МФ).

6. Показано, что изменение параметров печатных проводников бортовой РЭА КА может изменить знак разности погонных задержек четной и нечетной мод связанных линий.

7. Получены аналитические математические модели частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости для типовых материалов ПП.

8. Теоретический инструментарий моделирования ЭМС бортовой РЭА КА до частоты 40 ГГц расширен разработанной методикой анализа пассивных цепей с учётом паразитных параметров и полученными многорезонансными моделями резистора, конденсатора и индуктивности.

Практическая значимость

1. Получены патенты на 3 полезные модели (модальный фильтр; устройство воздействия на аппаратуру; устройство модального зондирования) и 7 изобретений (устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов; устройство защиты от импульсных сигналов; устройство обнаружения импульсов в МПЛП; устройство обнаружения, идентификации и диагностики МПЛП; линия задержки, неискажающая импульс; меандровая линия с дополнительной задержкой; микрополосковая линия (МПЛ) со стабильной задержкой).

2. Программно реализованы 3 модели для вычисления отклика произвольных схем МПЛП, что позволяет (в рамках квазистатического подхода) осуществить моделирование временного и частотного откликов реальных фрагментов многопроводных межсоединений.

3. Предложено уменьшение модальных искажений в межсоединениях ПП нанесением покрывающего диэлектрического слоя.

4. Показана возможность модальных искажений в реальных кабелях.

5. Предложена защита (и её расчет) от СКИ посредством их последовательного разложения в отрезках многопроводных межсоединений на большее число импульсов меньшей амплитуды.

6. Предложен способ коррекции формы импульсного сигнала с помощью меандровых линий за счет взаимных влияний в проводниках линии.

7. Показано, что разность погонных задержек мод двух проводников, планарно расположенных в диэлектрике над идеально проводящей плоскостью, меняет свой знак, достигая значений от $-0,8$ до $+1,5$ нс/м.

8. При моделировании модальных явлений получены частотные и временные отклики для различных видов линий передачи, форм и чисел их проводников, значений параметров их проводников и диэлектриков, а также количества и длин отрезков линий передачи и граничных условий на их концах.

9. Выполнен анализ собственных значений и векторов для гибкого печатного кабеля бортовой РЭА КА, и показана возможность модального разложения импульса в нём.

10. Разработаны рекомендации по улучшению ЭМС: пяти УЭМ энергопреобразующего комплекса; УЭМ блока аппаратуры радионавигации; ПП радиотракта системы автономной навигации (САН); печатного узла САН.

11. Усовершенствован учебный процесс 3-х университетов: КНИТУ-КАИ, НИ ТГУ, ТУСУР.

Методология и методы исследования

В работе применены компьютерное моделирование и натурный эксперимент, различные виды анализа (схемотехнический, квазистатический, электродинамический), численные методы, методы анализа и синтеза линейных электрических цепей, теория линий передачи.

Положения, выносимые на защиту

1. Модели, алгоритмы и программы для вычисления отклика схемы из отрезков многопроводных линий передачи с RLC-элементами на стыках, отличающиеся учетом паразитных параметров пассивных компонентов и частотной зависимости диэлектрической проницаемости материалов печатной платы, применимы для квазистатического анализа электромагнитной совместимости печатных узлов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

2. Технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках за счет оптимального выбора параметров проводников и диэлектриков позволяет минимизировать модальные искажения полезного сигнала и перекрестные наводки нанесением на поверхность печатной платы дополнительного диэлектрического слоя, а также минимизировать искажения импульсного сигнала из-за перекрестных наводок и потерь в линиях задержки.

3. Технология модальной фильтрации позволяет усовершенствовать защиту от нежелательных сигналов за счет их модального разложения в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением.

4. Технология модального разложения и восстановления позволяет выявить скрытые возможности проникновения нежелательных сигналов в многоотрезочных структурах многопроводных линий.

5. Печатные и кабельные модальные фильтры позволяют реализовать эффективную защиту от нежелательных импульсов:

- модальный фильтр из отрезка плоского кабеля длиной 15 м уменьшает в 17 раз амплитуду импульса длительностью 200 пс;

- модальные фильтры с боковой связью на подложке из стеклотекстолита с полосой пропускания 100 МГц, имеющие длины 1,3–2,5 м, уменьшают в 8–10 раз амплитуду импульса длительностью 240–280 пс;

- модальные фильтры с лицевой связью на подложке из стеклотекстолита, имеющие длины 0,2–0,65 м, уменьшают в 5–6 раз амплитуду импульса длительностью 0,8–1 нс.

Достоверность результатов

1. Достоверность моделей, алгоритмов и программ подтверждена сравнением результатов моделирования с результатами других авторов, других программных продуктов и натурального эксперимента, проведенного на сертифицированном оборудовании. Для моделей пассивных двухполюсных компонентов из RLC-элементов получена согласованность результатов экспериментальных исследований сертифицированными векторными анализаторами цепей. Для моделей частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов ПП показана воспроизводимость результатов при многократных измерениях.

2. Достоверность предложенных технологий для обеспечения ЭМС основана на известных методах теории цепей, в частности на модальном анализе. Полученные теоретические результаты подтверждены натурными экспериментами, как качественно, так и количественно, в пределах допустимой погрешности измерения. Эксперименты выполнены на разных сертифицированных приборах, видах реальных ПП и кабелей.

3. Возможность практической реализации устройств подтверждена их изготовлением в АО «НПЦ «Полус» и «ИСС». Для совершенствования параметров устройств использованы проверенные методы оптимизации. Получено совпадение результатов, полученных при квазистатическом анализе, электродинамическом анализе и экспериментально. Работоспособность созданных устройств подтверждена натурными экспериментами и их эксплуатацией.

4. Реализуемость предложенных способов и устройств на практике подтверждена моделированием и экспериментально.

Использование результатов исследований

1. Оценка паразитных электромагнитных эффектов в ПП и в кабелях аппаратуры, разрабатываемой в НПЦ «Полус».

2. НИР «Разработка технической документации прибора для прямого видеонаблюдения состояния элементов эксплуатационных и фильтровых колонн нагнетательных и контрольных скважин полигона подземного захоронения ЖРО СХК», рег. ном. НИР 0120.0 509.654, хоздоговор 20-05, ТУСУР, Томск, 2005 г.

3. Проект «Разработка системы компьютерного моделирования электромагнитной совместимости», заключительный отчет ВТК-15 по мероприятию 3.1.3а инновационной программы ТУСУР, 2006 г.

4. ОКР «Разработка и поставка аппаратно-программного комплекса для проведения анализа взаимовлияний электрических сигналов бортовой аппаратуры», хоздоговор 28/08 от 14.04.2008, шифр «АПК–ТУСУР», генеральный заказчик Министерство обороны РФ.

5. Изготовление и поставка 8 макетов МФ для защиты сети Fast Ethernet от сверхкоротких импульсов, хоздоговор НИИЦ/НИР/10-01 от 15.01.2010 с ФГУП «ЦентрИнформ», г. Санкт-Петербург.

6. ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной совместимости и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор 95/10 от 24.11.2010 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

7. ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

8. Проект «Развитие объектов инновационной инфраструктуры ТУСУРа, включая технологический бизнес-инкубатор, обеспечивающей укрепление кооперации университета с промышленными предприятиями в создании высокотехнологичных производств и целевой подготовке кадров по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий РФ» в рамках реализации Постановления 219 Правительства РФ в 2011–2012 гг.

9. Подпроект 2.2.1.3 «Разработка комплекса учебно-методического и программного обеспечения для исследования и проектирования инновационных устройств с учётом ЭМС» на 2013 г. в рамках реализации программы стратегического развития ТУСУРа 2012–2016 гг.

10. НИР «Разработка основ синтеза методом «выращивания» 2D и 3D топологий нерегулярных микрополосковых структур, управляемых интегральных устройств ВЧ и СВЧ диапазонов и их экспериментальное исследование» в рамках Федеральной целевой программы, государственный контракт П 690 от 12.08.2009.

11. НИОКТР «Разработка эскизных проектов модальных фильтров защиты различной аппаратуры от импульсов высокого напряжения», контракт 8569р/13904 от 17.12.2010, г. Томск.

12. НИОКТР «Теоретико-экспериментальные исследования и разработка макета устройства модального зондирования многопроводных структур», контракт 10466р/18719 от 08.06.2012, г. Томск.

13. НИР «Разработка математических моделей для трассировки меандровых линий задержки с оптимальными параметрами», договор № Р-20130122 от 18.01.2013, г. Томск.

14. НИР «Исследование новых модальных явлений в структурах многопроводных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением», грант РФФИ 06-08-01242, 2006 г.

15. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по математическому моделированию, ориентированных на электромагнитную совместимость бортовой аппаратуры перспективных космических аппаратов», грант РФФИ 13-07-98017, 2013–2014 гг.

16. НИР «Комплексные исследования по разработке алгоритмов, математического обеспечения и средств проектирования для создания новых элементов защиты и контроля вычислительных систем на основе модальных явлений», грант РФФИ 14-29-09254, 2014–2016 гг.

17. НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РФФИ 14-19-01232, 2014–2016 гг.

18. 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 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

19. Защита сетевых адаптеров вычислительной техники и серверного оборудования в МЧС России по Томской области, 2015 г.

20. Учебный процесс КНИТУ-КАИ.

21. Учебный процесс НИ ТГУ: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Космические промышленные системы» для предприятия «Газпром космические системы», г. Королев.

22. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР.

23. Регистрация программ для ЭВМ: получено 27 свидетельств.

24. Патенты: 3 полезных модели, 7 изобретений, 28 заявок на изобретение.

Использование результатов подтверждено 18 актами внедрения.

Апробация результатов

Подготовка заявок и победа в конкурсах: РФФИ, 2006 г., 2013–2014 гг., 2014–2016 гг.; РФФИ, 2014–2016 гг.; проектная часть государственного задания в сфере научной деятельности, 2014–2016 гг.; программа «СТАРТ» Фонд содействия инновациям, 2010 г., 2012 г.; стипендия Президента РФ для молодых ученых 2012–2014 гг., 2015–2016 гг.

Результаты докладывались и представлялись в материалах симпозиумов и конференций: Межд. цюрихский симп. по ЭМС, 2006, 2007; Межд. конф. EUROEM, 2008, 2012. Межд. конф. по защите от молнии, 2010, 2012; Межд. конф. по численному электромагнитному моделированию и оптимизации для ВЧ, СВЧ и терагерцовых приложений, 2014; Межд. конф. по энергетике, окружающей среде и материаловедению, 2014; Межд. конф. по прикладной физике, моделированию и компьютерам, 2015; Межд. конф. по численному анализу и прикладной математике, 2015; Межд. конф. по моделированию и прикладной математике, 2015; Межд. конф. по электрическим характеристикам монтажа и систем электроники, 2015; Межд. конф. молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам, 2015; Межд. IEEE Сибирская конф. по управлению и связи 2009, 2015; Межд. симп. по ЭМС и

электромагнитной экологии, 2005, 2007, 2011; Научно-техн. конф. студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», 2004–2008, 2010–2013; Всерос. научно-практ. конф. «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности», 2004, 2005, 2007; Научно-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства», 2008, 2010; Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 2004, 2007, 2009, 2015; Науч. Конф. «Электрофизика материалов и установок», 2007 г.; Межд. конф. «Авиация и космонавтика», 2012; Межд. научно-практ. конф. «Образование и наука без границ», 2013; Молодёжная научно-техн. конф. «Инновационный арсенал молодёжи», 2013; Рос. научно-практ. конф. «Разработка и производство отечественной электронной компонентной базы», 2014; Межд. научно-практ. конф. студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», 2011; Научно-техн. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС», 2011; Межд. молодёжная науч. конф. «Туполевские чтения», 2004, 2007, 2008; Всерос. молодёжная научно-практ. конф. «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики», 2015; Межд. научно-метод. конф. «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов, 2016.

Публикации. По результатам опубликовано 164 работы: 6 монографий; 34 статьи в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в зарубежных журналах; 4 статьи в других журналах; 10 патентов; 27 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 14 докладов и 2 тезисов в трудах зарубежных конференций; 51 доклад и 14 тезисов в трудах отечественных конференций.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 5 глав, заключение, список литературы из 344 наим., приложение 64 с. Объём диссертации без приложения – 295 с., в т.ч. 206 рис. и 38 табл.

Личный вклад. Результаты работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично. Вклад автора состоит в непосредственном участии в разработке моделей, алгоритмов, методик, технологий и устройств для обеспечения ЭМС бортовой РЭА КА, а также в обработке и интерпретации данных численного моделирования и натуральных экспериментов, подготовке основных публикаций по диссертационной работе. Программная реализация квазистатических моделей для вычисления временного отклика выполнена совместно с А.О. Мелкозеровым. Исследование модальных явлений выполнено совместно с И.Е. Самотиным, П.Е. Орловым, И.Г. Бевзенко. Моделирование частотной зависимости параметров материалов ПП выполнено совместно с В.К. Саловым. Создание моделей типовых пассивных компонентов с учетом паразитных параметров выполнено совместно с И.Ф. Калимулиным. Некоторые результаты исследований получены совместно с соавторами опубликованных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы.

В главе 1 выполнен обзор современного состояния проблемы обеспечения ЭМС бортовой РЭА КА, технологий помехозащиты РЭА, а также методов и

средств моделирования печатных узлов. На основе обзора сформулированы цель и задачи работы.

В главе 2 представлены модели, алгоритмы, программы и методики для моделирования ЭМС.

Разработаны алгоритмы для 3-х моделей из работ F. Tesche, A. Djordjevic, M. Nakhla. Программно реализован модуль RESPONSE, позволяющий выполнять вычисление отклика фрагментов реальной печатной платы РЭА в рамках адекватности квазистатического подхода. Выполнено тестирование программной реализации путем сравнения с опубликованными результатами измерений (отличие составило 3%) или моделирования, а также полученными в программе PSpice (отличие составило 0,6% для случая без потерь) и системе CST MWS (отличие составило 8%). Кроме того, разработаны программы для имитационного моделирования ЭМС печатных узлов бортовой РЭА КА в системе TALGAT. Все результаты моделирования, представленные в работе, получены на основе созданного модуля RESPONSE.

Рассмотрен импеданс пассивных компонентов в диапазоне частот, и продемонстрировано существенное различие между идеальными элементами, классическими моделями и реальными компонентами. Разработана методика синтеза широкополосных моделей пассивных двухполюсных компонентов из RLC-элементов. По ней получены математические модели для типовых пассивных компонентов с учетом паразитных параметров компонента и монтажа в диапазоне частот до 40 ГГц. Частотные зависимости модуля и фазы импеданса (Z) для полученных моделей и измерений конденсатора и индуктивности представлены на рис. 2.1. Их сравнение показало максимальное среднеквадратичное отклонение для модуля 7 Ом, а для фазы -24° . Недостатком таких моделей является необходимость измерения и создания моделей для каждого используемого стека печатной платы, а достоинством – учёт паразитных параметров контактных площадок, припоя и частотной зависимости параметров диэлектрика.

Разработана методика определения значений относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) двухсторонне фольгированных материалов и представлен алгоритм вычисления ϵ_r из измеренного коэффициента отражения резонатора. Выявлена высокая чувствительность метода к точности определения частот резонансов. Показано, что погрешность измерения увеличивается с уменьшением размеров резонатора. Для трех резонаторов на FR-4 показана согласованность ϵ_r в пересечении диапазонов частот (844–1975 МГц) и выявлены нефизичные выбросы. Зависимость ϵ_r аппроксимирована полиномом пятой степени.

Разработаны и представлены 3 методики для анализа ЭМС печатных узлов РЭА. Методика предварительного анализа ЭМС УЭМ бортовой РЭА основана на качественном анализе (без моделирования) и позволяет разработать конкретные рекомендации по улучшению ЭМС УЭМ, без знания специфики схемотехники УЭМ (что позволяет использовать методику внешними специалистами к разработкам на режимных предприятиях) и только

посредством изменений в трассировке УЭМ (что позволяет не изменять сборочный чертеж печатной платы). Методика схемотехнического моделирования печатного узла реализует учёт паразитных параметров компонентов и печатной платы и позволяет выполнить моделирование испытаний по ЭМС до частоты 40 ГГц. Методика анализа целостности сигнала печатной платы в TALGAT отличается использованием разработанных моделей, алгоритмов и программ для вычисления отклика схемы из отрезков МПЛП с RLC-элементами на стыках и позволяет выполнить анализ целостности сигналов в реальных фрагментах РЭА. Приведены примеры анализа целостности сигнала и питания в печатном узле РЭА, демонстрирующие применимость методик.

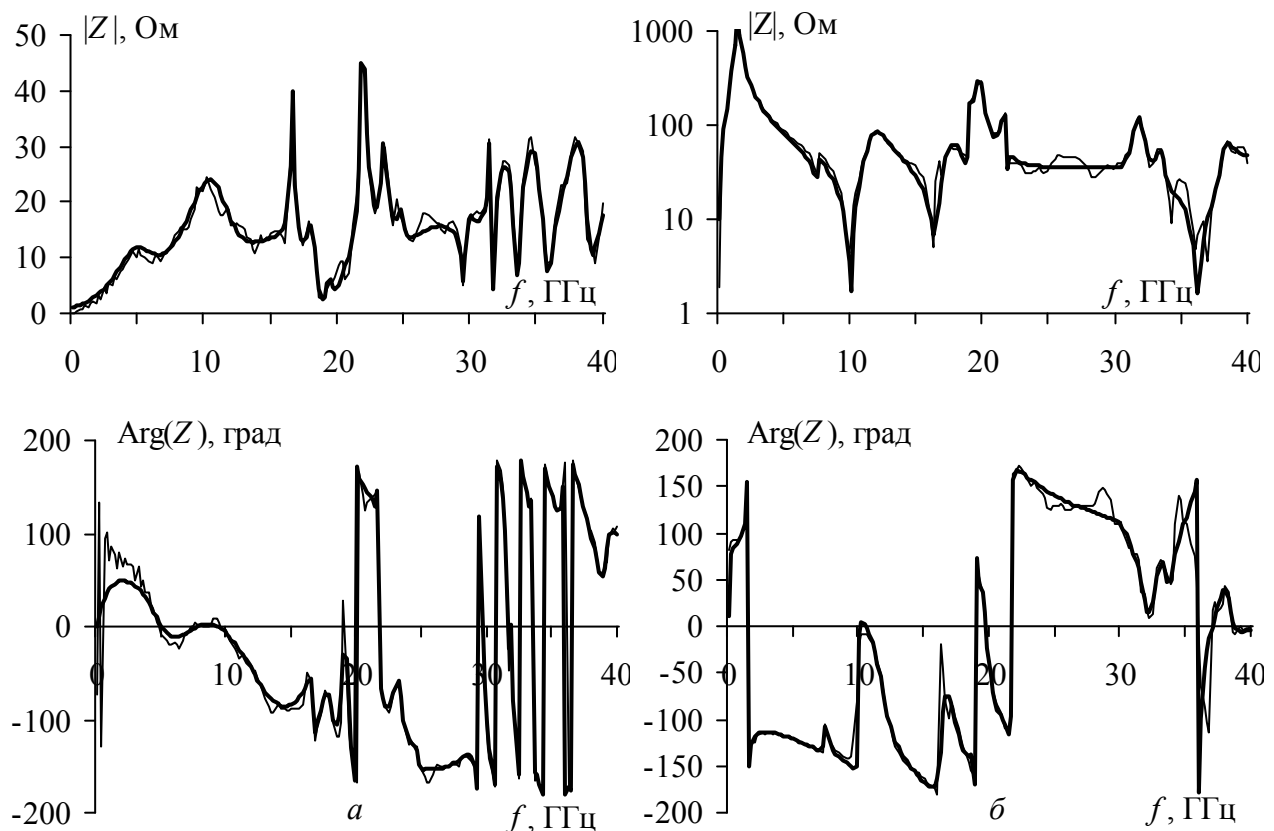


Рис. 2.1 – Частотные зависимости модуля и фазы импеданса конденсатора (а) и индуктивности (б): модель (—) и измерение (---)

В главе 3 представлены 3 технологии (под которыми понимается совокупность методов, процессов и материалов, направленных на получение продукции) для обеспечения ЭМС.

Технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках за счет оптимального выбора параметров проводников и диэлектриков. Исследованы возможности уменьшения искажения сигнала в активном проводнике и дальнейшей перекрестной наводки в структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Они называются здесь *модальными* и исследуются в «чистом» виде (в отсутствии других искажений) в зависимости от числа связанных линий и их параметров. На примере МПЛ показано влияние диэлектрического покрытия на форму импульсного сигнала в активном

(рис. 3.1) и пассивном проводниках линии. Выявлено, что для данных структур существует оптимальное значение $h_2/w \approx 0,25$, которое уменьшает модальные искажения и дальнюю перекрестную наводку при всех рассмотренных вариантах воздействий в 2–24 раза. Показано, что модальные искажения импульса в отрезке МПЛП тем меньше, чем строже выполняется условие

$$l[\max(\tau_i) - \min(\tau_i)] \ll t_r, \quad i=1, \dots, N, \quad (3.1)$$

где l – длина отрезка, τ_i – погонная задержка i -й моды отрезка, t_r – время фронта импульса, N – число проводников в отрезке (не считая опорного). Это подтверждается данными табл. 3.1, из которой видно, что максимальная разность погонных задержек для $h_2/w = 0,25$ значительно меньше, чем для $h_2/w = 0$, и именно этим объясняется практически полное отсутствие искажений при $h_2/w = 0,25$ на рис. 3.1.

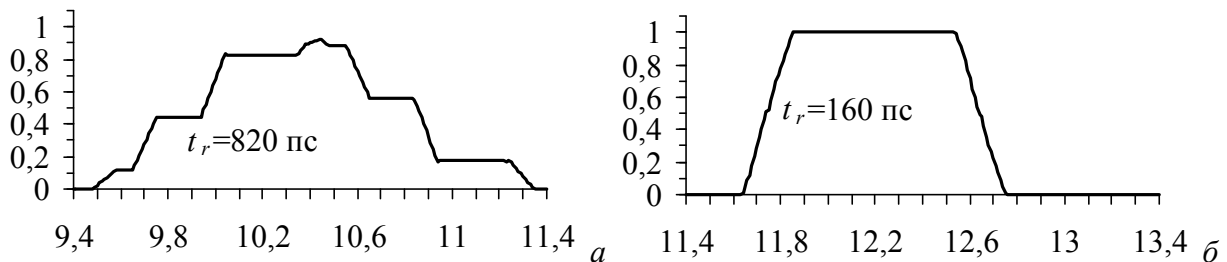


Рис. 3.1 – Формы напряжения (В, нс) в конце активного проводника при $t_d = 800$ пс, $l = 2$ м, $N = 4$ для $h_{d2}/w = 0$ (а); $0,25$ (б)

Таблица 3.1 – Погонные задержки мод и их максимальная разность (пс/м)

h_2/w	$N=2$			$N=3$				$N=4$				
	τ_1	τ_2	$\max(\tau_i) - \min(\tau_i)$	τ_1	τ_2	τ_3	$\max(\tau_i) - \min(\tau_i)$	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	$\max(\tau_i) - \min(\tau_i)$
0	4799	5064	265	5131	4896	4758	373	5173	4740	4970	4826	433
0,25	5850	5843	7	5824	5871	5855	47	5818	5836	5876	5875	58

Из представленного анализа сделаны следующие выводы:

1. Для рассмотренных МПЛ изменением h_2/w можно изменять максимальную разность погонных задержек мод, причём есть оптимальное значение ($h_2/w \approx 0,25$ для всех N), соответствующее минимуму этой разности.

2. Рост числа проводников исследованной МПЛ увеличивает максимальную разность погонных задержек мод, а следовательно, модальные искажения (под которыми понимаются изменения сигнала за счет разности задержек мод его поперечных волн в МПЛП). Этот факт может существенно влиять на модальные искажения сигнала в плотных межсоединениях, например, в многожильных печатных кабелях. Иными словами, сигнал в активной линии способен сильнее искажаться в зависимости от того, проходит ли эта линия: одна, вблизи с одной, двумя или несколькими соседними линиями, пусть даже без источников в них.

3. Для оценки модальных искажений достаточно вычислить максимальную разность погонных задержек мод без вычисления временного отклика (рис. 3.2).

4. При распространении импульса, возбуждаемого в активном проводнике отрезка линии с неоднородным диэлектрическим заполнением, состоящей из N проводников (не считая опорного), он может подвергаться модальным искажениям вплоть до разложения на N импульсов меньшей амплитуды из-за различия погонных задержек мод в линии. Полное разложение импульса в

отрезке длиной l имеет место, если общая длительность импульса t_{Σ} меньше минимального модуля разности задержек распространения мод в линии, т.е. при условии

$$t_{\Sigma} < l \cdot \min|\tau_i - \tau_k|, \quad i, k=1, \dots, N, \quad i \neq k, \quad (3.2)$$

где $\tau_{i(k)}$ – погонная задержка $i(k)$ -й моды отрезка.

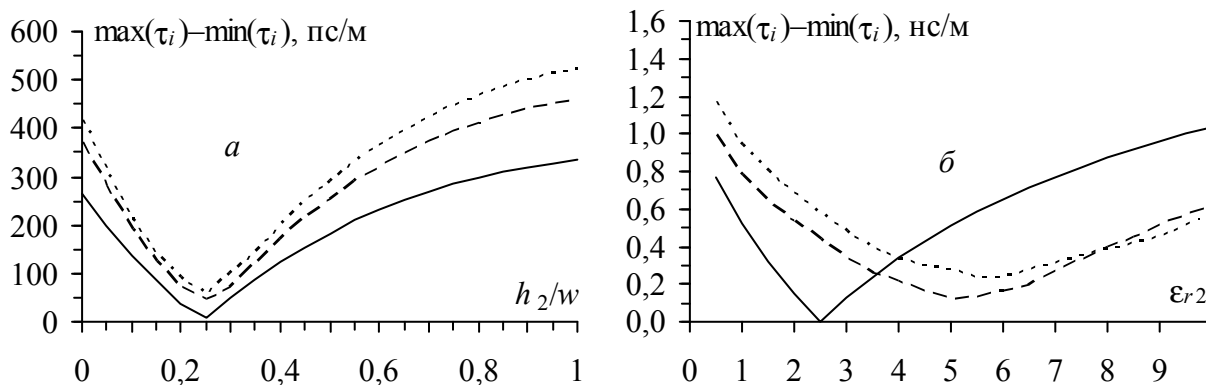


Рис. 3.2 – Зависимости максимальной разности погонных задержек мод для $N = 2$ (—), 3 (---), 4 (---) микрополосковой линии (а) и кабеля марки RJ-12 (б)

Результаты моделирования и эксперимента по уменьшению взаимовлияний электрических сигналов в межсоединениях помехозащищенной теплопроводной монтажной платы показали, что лак уменьшает перекрестную наводку в конце линии (рис. 3.3). Формы сигнала, полученные моделированием в TALGAT и экспериментально, согласуются.

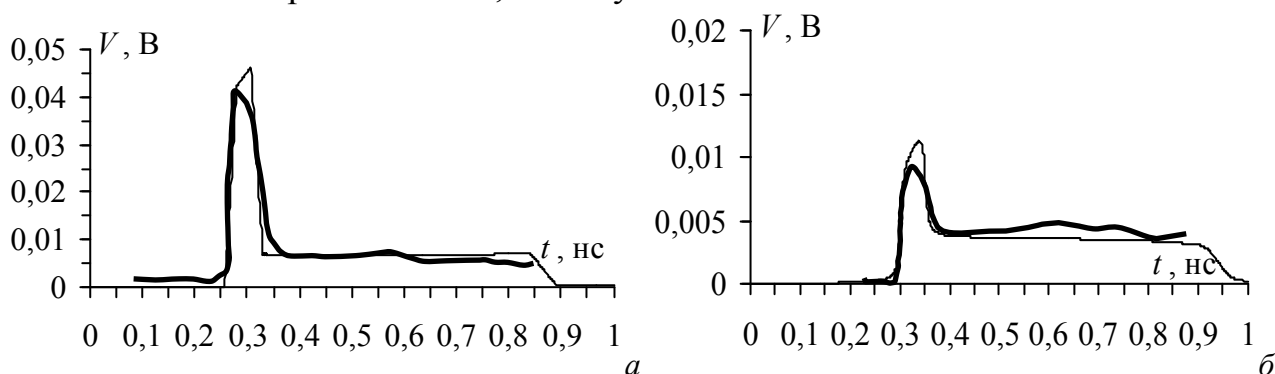


Рис. 3.3 – Формы напряжения в конце пассивного проводника, полученные экспериментально (—) и в TALGAT (—): без лака (а) и с лаком (б)

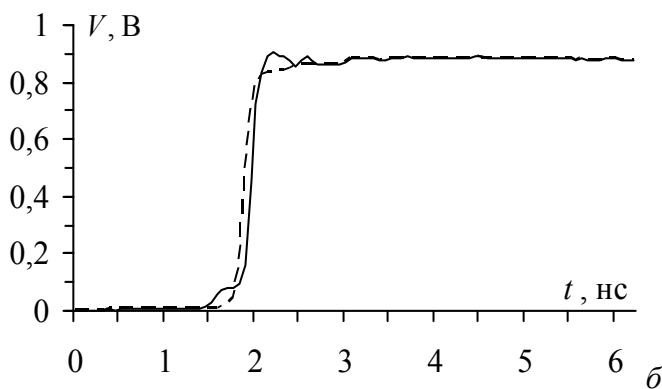


Рис. 3.4 – Фотография печатных плат (а) и осциллограммы сигналов в конце линий длиной $0,162$ м (б): из одного проводника (---) и меандровой (—) при $s = 0,5w$

Выполнено исследование влияния структур меандровых линий на форму импульсного сигнала. В результате предложена и запатентована линия задержки, которая обеспечивает прохождение импульсного сигнала без искажений его формы. Для уменьшения влияния потерь на импульсные сигналы в проводниках ПП предложено использовать меандровые линии из одного витка для коррекции формы импульсного сигнала (рис. 3.4).

Технология модальной фильтрации. Для защиты РЭА от воздействия СКИ предложено использовать принцип модальной фильтрации, который основан на модальном разложении сигнала. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование модальной фильтрации. Получены формулы: для амплитуд напряжения импульсов разложения в проводниках согласованной МПП (3.3); связывающие число и параметры отрезков для разложения импульса с заданными параметрами (3.4); для вычисления коэффициента ослабления на каскад МФ при условии, что все сопротивления имеют значения $R=(Z_e Z_o)^{1/2}$ (3.5).

$$\mathbf{V}=\mathbf{S}_v \text{diag}(\mathbf{V}_m), \mathbf{V}_m=0,5 \cdot \mathbf{S}_v^{-1} \cdot \mathbf{E}, \quad (3.3)$$

где \mathbf{S}_v – матрица размера $N \times N$, содержащая собственные вектора матрицы $\mathbf{L}\mathbf{C}$; \mathbf{E} – вектор размера $N \times 1$, состоящий из амплитуд источников напряжения.

$$l_k=l(2^{k-1}), k=1, \dots, n; \quad L_n=l(2^n-1), \quad (3.4)$$

где n – количество отрезков l_k – длина k -го отрезка и L_n – общая длина МФ.

$$V_0/V_n=20\lg[(k+1)^2/(2k)]^n, \text{ дБ}, \quad (3.5)$$

где $k=(Z_e/Z_o)^{1/2}$ при $Z_e>Z_o$, V_0 – напряжение на нагрузке в исходном состоянии.

Для подтверждения возможности разложения импульсного сигнала в связанной МПП изготовлены 2 печатные платы с толщиной диэлектрика $h_d=1$; 0,2 мм и длиной проводников $l=8,04$; 5,64 м. На один из проводников МПП (плат 1, 2) подавали импульсный сигнал с параметрами: $U_0=615$ мВ, $t_r=700$ пс, $t_f=700$ пс, $t_d=0$ нс (общая длительность импульса – $t_\Sigma=1,4$ нс). Полученные осциллограммы представлены на рис. 3.5, где видно разложение исходного импульса на 2 импульса, амплитуда которых уменьшены из-за потерь и дисперсии гораздо более чем в 2 раза: для платы 1 они равны 80 и 85 мВ, а для платы 2 – 58 и 71 мВ, т.е. вносимые затухания составляют 17,2 дБ и 18,8 дБ.

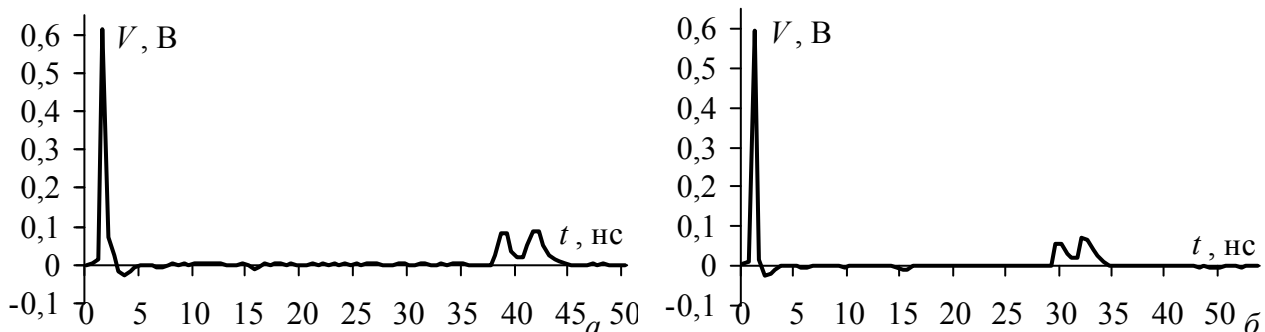


Рис. 3.5 – Осциллограммы сигналов в начале (импульс слева) и в конце (импульсы справа) активного проводника плат 1 (а) и 2 (б)

Для подтверждения возможности разложения импульса и использования плоского кабеля в качестве МФ выполнено 2 эксперимента. В эксперименте 1 между парой соседних проводников в отрезках плоского и круглого кабелей

длиной по 4,8 м подавался близкий к трапецеидальному импульс с параметрами: $U_0=0,7$ В, $t_r=345,6$ пс, $t_f=276$ пс, $t_d=137,8$ пс. (На концах пассивного проводника кабеля – холостой ход.) Осциллограммы напряжения в конце отрезка представлены на рис. 3.6.

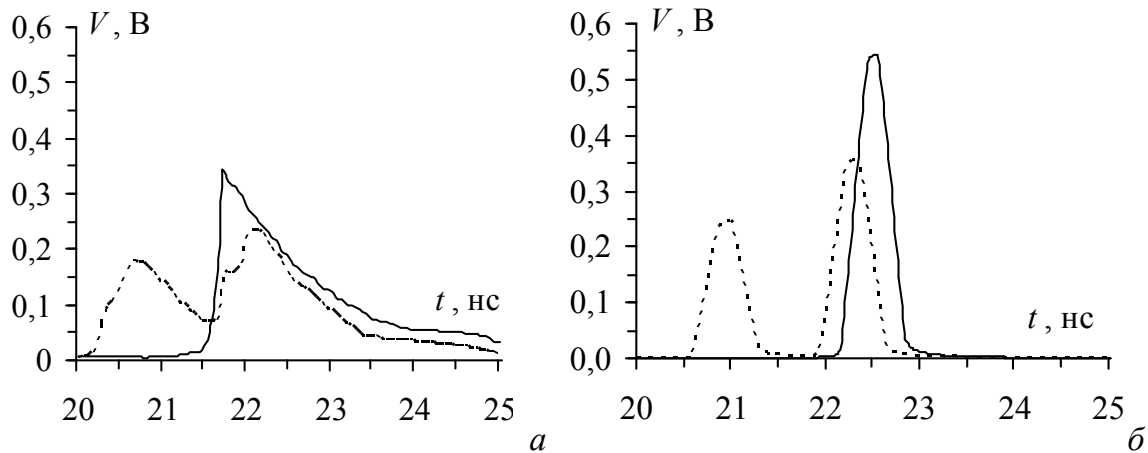


Рис. 3.6 – Сравнение форм сигнала для плоского (---) и круглого (—) кабелей: экспериментальных (а) и вычисленных в TALGAT (б)

Видно, что исходный импульс раскладывается в конце активного проводника плоского кабеля на 2 импульса с амплитудами 182 и 234 мВ. Различие амплитуд вызвано влиянием потерь и рассогласования. Для круглого кабеля амплитуда импульса в конце активного проводника уменьшилась из-за потерь до 348 мВ, но разложения нет. В эксперименте 2 использовался отрезок плоского кабеля длиной 15 м. В результате импульс в конце кабеля разложился на 2 импульса с амплитудами 97 и 100 мВ и разностью задержек (измеренной маркерами между пиками) 5,2 нс (рис. 3.7 а). После этого, на расстоянии 5 м от источника воздействия был сделан разрыв в пассивном проводнике кабеля. В итоге, получилась структура, состоящая из 2-х последовательно соединенных отрезков с длинами 5 м и 10 м. Полученная осциллограмма представлена на рис. 3.7 б. Видно, что в конце 2-го отрезка импульс разложился на 4 импульса с амплитудами 38,5; 61,6; 70; 92,2 мВ и задержками между ними 1,3; 1,7; 1,6 нс. Однако очень пологий спад каждого импульса, вызванный потерями и дисперсией на большой длине кабеля, привел к значительному слиянию импульсов с последовательным ростом их амплитуд.

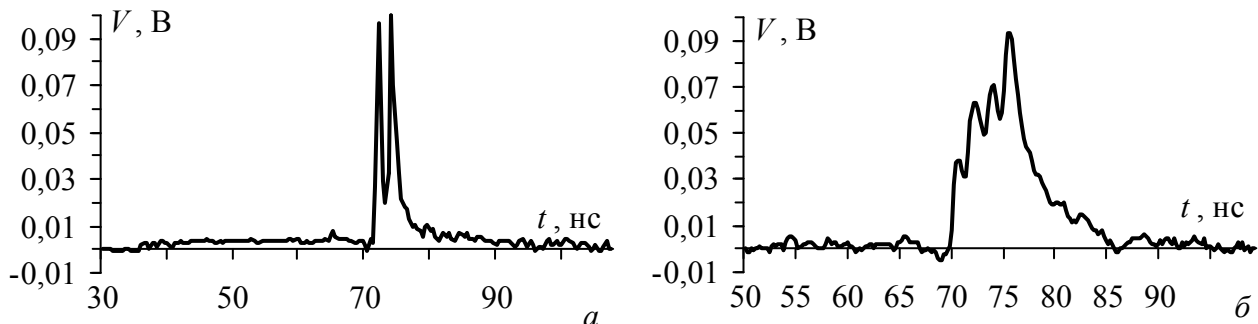


Рис. 3.7 – Осциллограммы сигналов в конце активного проводника одного (а) и двух (б) отрезков плоского

Показано, что МФ ослабляют СКИ. Стойкость МФ к воздействию радиации, высока, поскольку они не используют полупроводниковых компонентов. МФ не имеют ограничений ресурса (как, например, количество срабатываний у газоразрядника), используют дешевый материал, отличаясь от аналогов тем, что в них могут вовсе не использоваться радиоэлектронные компоненты, а применяются структуры связанных линий, которые способствуют разложению импульса на импульсы меньшей амплитуды, что позволяет обеспечить защиту РЭА от СКИ.

Технология модального разложения и восстановления.

На примерах многопроводных МПЛ и плоских кабелей продемонстрирована возможность модального разложения и восстановления импульса, для краткости называемого модальным воздействием. Сформулировано условие такого восстановления: в общем случае, для n отрезков N -проводных межсоединений длиной l_j восстановление будет наиболее эффективным при одновременном приходе всех мод к концу структуры, т.е. при условии

$$\sum_{j=1}^n l_j \cdot \tau_{1j} = \sum_{j=1}^n l_j \cdot \tau_{2j} = \dots = \sum_{j=1}^n l_j \cdot \tau_{Nj}, \quad (3.9)$$

где τ_{ij} – погонная задержка i -й моды j -го отрезка.

Для подтверждения возможности восстановления импульса использовался плоский трехпроводный кабель длиной 19,95 м. Импульсный сигнал треугольной формы ($U_0=690$ мВ, $t_r=290,5$ пс, $t_f=290,5$ пс, $t_d=0$ нс) подавался между крайним и средним проводниками кабеля. Сигнал в конце активного проводника разложился на 2 импульса с амплитудами 68 и 89,4 мВ (рис. 3.8 а). Далее, часть кабеля постепенно погружали в воду, наблюдая сближение 2-х исходных импульсов и их слияние в 1 импульс с максимальной амплитудой 131 мВ (рис. 3.8 б). Получилась структура из 3-х отрезков (средний в воде) с длинами (начиная от источника): 14,24 м; 3,33 м; 2,38 м.

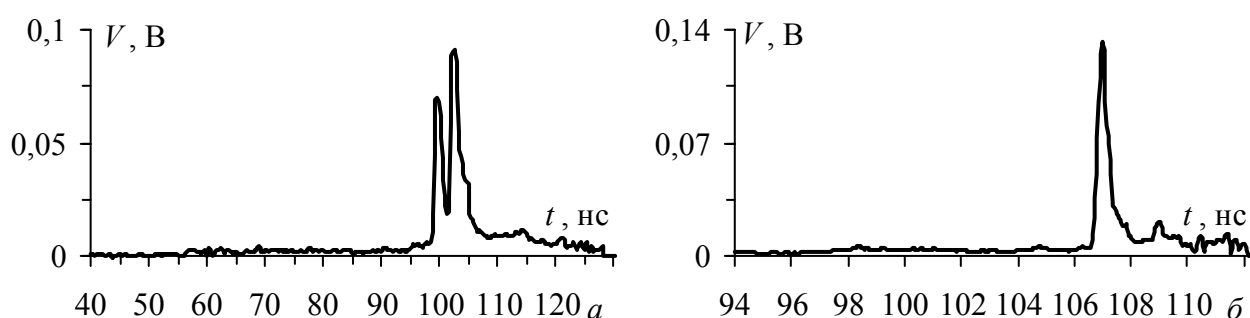


Рис. 3.8 – Осциллограммы в конце активного проводника плоского трехпроводного кабеля: импульсы разложения (а) и восстановленный импульс (б)

Разработана методика поиска структур, в которых возможны скрытые модальные воздействия, приводящие к перенапряжению и отсутствию срабатывания защитных компонентов. Рассмотрены четыре варианта модальных антиподов (отрезков связанных линий с противоположными знаками разности погонных задержек мод). Показано, что их можно получить просто погружением отрезка в среду с ϵ_r большей, чем у его изоляции (такой средой, например, может быть вода), а также изменением толщины диэлектрического

слоя структуры (например, наматыванием изолянты на структуру или покрытием МПЛ слоем лака). Скрытый модальный антипод можно получить, изменяя значение ϵ_r внутренних (скрытых) полостей структуры. Получить модальный антипод без изменения ϵ_r среды вокруг структуры можно за счет изменения расположения проводников.

В главе 4 представлены устройства для помехозащиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

Модальная фильтрация в межсоединениях печатных плат.

Рассмотрены межсоединения помехозащищенной теплопроводной монтажной платы и ПП бортовой РЭА КА. Получено, что разность погонных задержек мод для разных линий и параметров может достигать 1,5 нс/м. В результате предложено изготавливать ПП с интегрированной модальной защитой, основанной на использовании существующих структур ПП, но с таким расположением проводников, которое обеспечит модальную защиту, повышающую помехоустойчивость печатного узла бортовой РЭА КА.

Модальный фильтр с боковой связью.

Для создания МФ с боковой связью рассмотрены несколько структур поперечных сечений связанных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением, обладающих эффектом модального разложения. Диэлектрическим материалом выбран стеклотекстолит ($\epsilon_r = 5$) из таких критериев, как широкое применение и дешевизна. Выбор диэлектрика с более высокой ϵ_r позволяет получить более высокую разность задержек мод в линии, что позволит сократить длину МФ. Однако, такие диэлектрики довольно дороги, и процесс изготовления МФ с ними технологически сложнее и дороже. В результате выбрана структура из печатных проводников, расположенных с двух сторон подложки (рис. 4.1 а). С помощью оптимизации (по критерию максимизации модуля разности погонных задержек четной и нечетной мод, в тракте 100 Ом) получены параметры структуры: $w=d=0,4$ мм, $s=0,4$ мм, $h=0,29$ мм, $t=105$ мкм. При этом учтены технические ограничения (сила тока, пробивное напряжение, технологические размеры при изготовлении и т.д.). Вычислены параметры для данной структуры в TALGAT, показавшие достижение $\Delta\tau=1$ нс/м и ослабление в 2,28 раза.

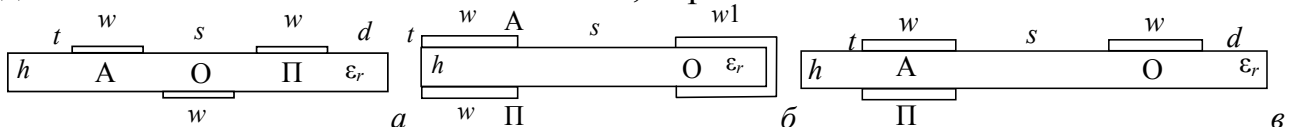


Рис. 4.1 – Поперечные сечения структур МФ: с боковой (а) и лицевой (б, в) связями.

Проводники МФ: А – активный; П – пассивный; О – опорный

Для полезного сигнала с верхней частотой спектра 100 МГц максимальная разность задержек мод в линии МФ без учета потерь и дисперсии должна составлять 2,5 нс. Поскольку сигнал в МФ разлагается на 2 сигнала (четной и нечетной мод) за счет их сдвига во времени, то амплитуда полезного сигнала после его прохода по МФ не должна быть ниже заданного уровня, например 0,707 (ниже на 3 дБ) относительно уровня на входе фильтра. Поэтому общая длина линии МФ равна 2,5 м. Представлены результаты одиночного и

совместного использования МФ с традиционными методами защиты. Приведено описание создания макетов МФ различных видов. Выполнен эксперимент при следующем воздействии (рис. 4.2): амплитуда – 292,5 мВ, фронт (0,1-0,9) – 320 пс, спад (0,1-0,9) – 200 пс, длительность (0,5) – 280 пс. Получено, что МФ с боковой связью на подложке из стеклотекстолита уменьшают в 8–10 раз (18–20 дБ) амплитуду импульса длительностью 240–280 пс.

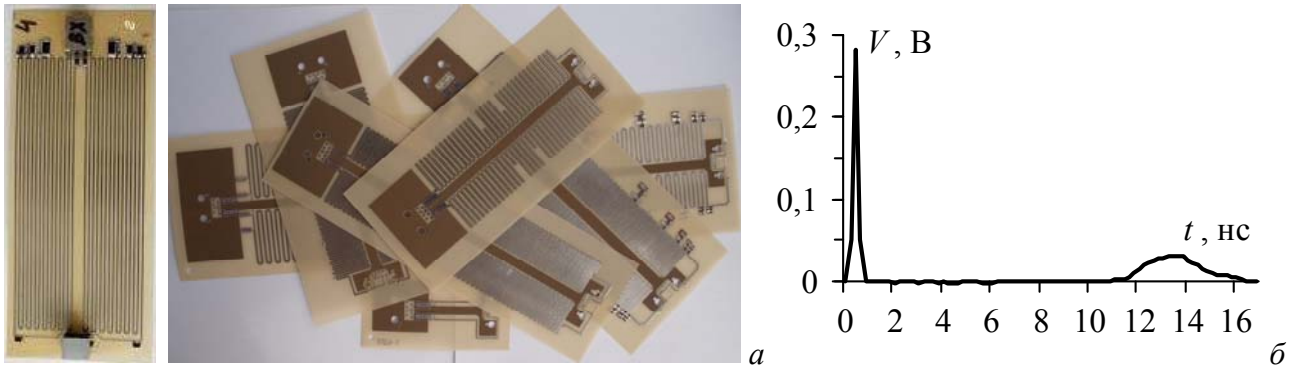


Рис. 4.2 – Макеты МФ с числом каскадов 4, 7 (а);
напряжение сигналов: исходного и на выходе МФ (б)

Модальный фильтр с лицевой связью. Рассмотрены структуры симметричного и асимметричного МФ на основе связанных линий с лицевой электромагнитной связью (рис. 4.1 б, в). Параметры симметричного МФ (рис. 4.1 б): $w=3,3$ мм, $s=3,6$ мм, $t=105$ мкм, $h=0,29$ мм, $w_1=2,1$ мм, $\epsilon_r=5$, $\Delta\tau=3,36$ нс/м, $Z_o=6,65$ Ом, $Z_e=411,2$ Ом. На рис. 4.3 представлен макет симметричного МФ длиной 0,65 м и осциллограмма сигнала на его выходе при воздействии импульса амплитудой 229 мВ (с учетом аттенюатора 20 дБ, на нагрузке 50 Ом) и длительностью около 800 пс по уровню 0,1. Видно, что импульсы на выходе МФ частично сливаются, а их амплитуды составляют 38 мВ и 10 мВ (с учетом аттенюатора 20 дБ), что соответственно в 6 и 23 раза меньше амплитуды входного воздействия. Меньшая амплитуда второго импульса обусловлена тем, что он определяется нечетной модой, основная часть которой распространяется в диэлектрике, подвергаясь большему влиянию диэлектрических потерь, чем четная мода (первый импульс).

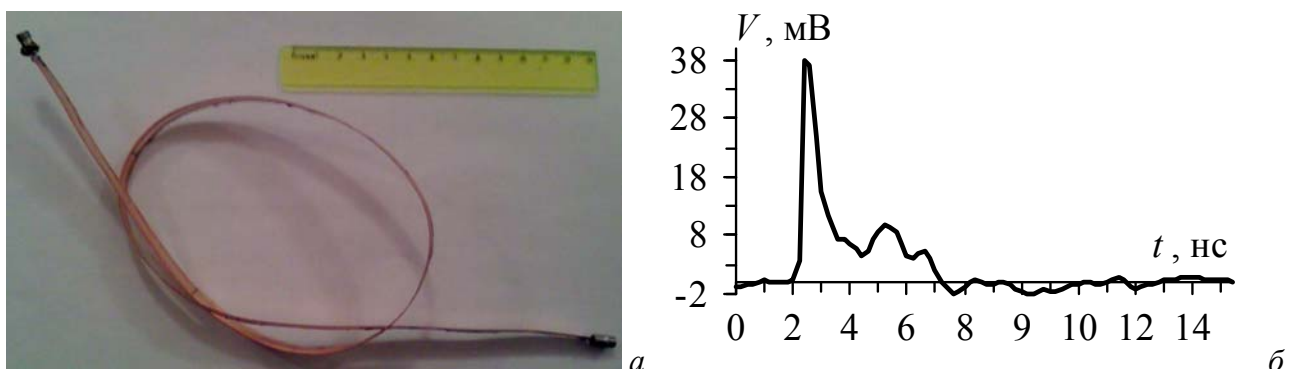


Рис. 4.3 – Симметричный МФ с лицевой связью:
макет (а); осциллограммы напряжения на выходе (б)

Параметры асимметричного МФ (рис. 4.1 в): $w=3$ мм, $s=4$ мм, $t=65$ мкм, $h=0,18$ мм, $\epsilon_r=5$, $\Delta\tau=3,6$ нс/м, $Z_o=4,65$ Ом, $Z_e=453,8$ Ом. На рис. 4.4 представлены различные макеты МФ длиной 0,2 м и осциллограмма сигнала на выходе МФ с указанными параметрами, полученного при воздействии импульса амплитудой 583 мВ (на нагрузке 50 Ом) длительностью 1 нс по уровню 0,1. Видно, что в результате модального разложения амплитуды выходных импульсов составили 113 мВ (первый импульс) и 91 мВ (второй импульс).

Таким образом, МФ с лицевой связью на подложке из стеклотекстолита, имеющие длины 0,2–0,65 м, уменьшают в 5–6 раз (14–15,6 дБ) амплитуду импульса длительностью 0,8–1 нс.

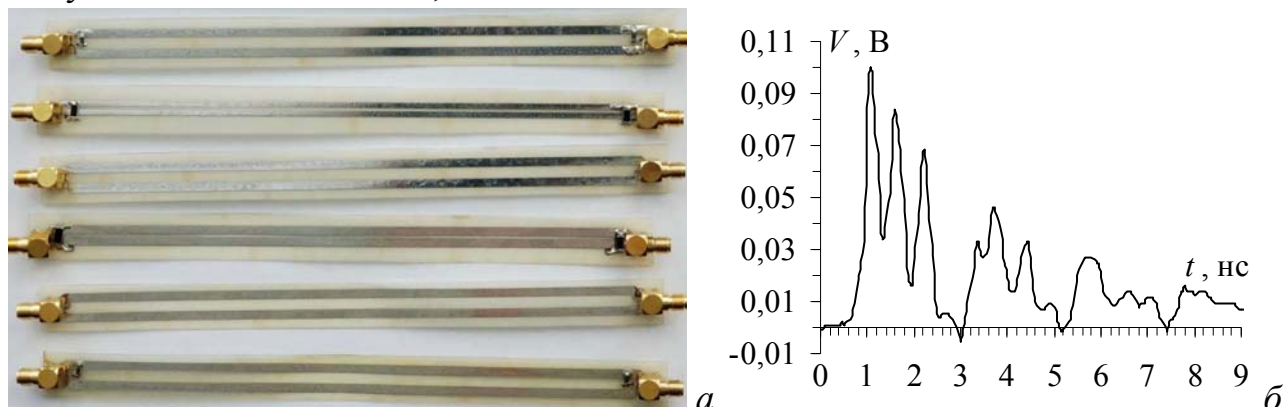


Рис. 4.4 – Асимметричный МФ с лицевой связью:

макеты (а) и осциллограмма напряжения на выходе МФ без лака с $w=3$ мм, $s=4$ мм (б)

Модальный фильтр на основе гибкого печатного кабеля (ГПК). Показана возможность использования модальной фильтрации в ГПК, применяемых в бортовой РЭА КА для обеспечения связи между блоками. Кроме того, в работе подтверждена работоспособность МФ с помощью моделирования и экспериментальных исследований. Показана возможность и значимость использования модальной фильтрации для ослабления воздействия в форме ЭСР и возможность практически полного подавления затухающей синусоиды определенной частоты путем выбора соответствующей этой частоте длины МФ в бортовой РЭА КА. Выполнен детальный анализ вариантов МФ в составе корпуса прибора с УЭМ бортовой РЭА КА.

В пятой главе кратко описаны технические решения по обеспечению ЭМС РЭА: модальный фильтр; устройство воздействия на аппаратуру; устройство модального зондирования; устройство защиты от импульсных сигналов; устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов; устройство обнаружения, идентификации и диагностики МПЛП; устройство обнаружения импульсов в МПЛП; МПЛ со стабильной задержкой; линия задержки, неискажающая импульс; меандровая линия с дополнительной задержкой; устройство защиты от импульсных сигналов на основе печатных трасс с лицевой связью; устройства защиты от СКИ на основе линий задержки; устройство защиты от импульсных сигналов с выравниванием амплитуд разложенных импульсов; устройство защиты от импульсных сигналов с заданным уровнем их ослабления; устройство защиты

от импульсных сигналов с удвоенным коэффициентом ослабления; четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от СКИ; трех-, четырех-, пятипроводные МПЛ, защищающие от СКИ; устройства защиты порта 100 Мбит/с; устройство контроля уровня кондуктивных эмиссий; способ резервирования электрических цепей; способы резервирования в печатных платах и кабелях.

В заключении сформулированы основные выводы по работе.

В приложении приведены акты внедрения результатов работы, копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и патентов на полезные модели и изобретения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Результаты работы, полученные проверенными методами, широко апробированные и опубликованные, а также масштабно и комплексно использованные, заключаются в следующем.

1. В рамках квазистатического подхода разработаны алгоритмы для вычисления временного и частотного откликов в произвольных схемах из отрезков МПЛ с произвольными RLC-схемами на стыках. Разработаны и протестированы программно-математические средства вычисления отклика на различные воздействия. Реализован программный модуль RESPONSE в системе TALGAT. Указанные алгоритмы могут быть использованы в САПР для анализа целостности сигнала, целостности питания и ЭМС РЭА различных структурных уровней (чипов, ИС, систем-на-кристалле, систем-в-корпусе, печатных плат, блоков), а реализованный модуль может быть использован для вычисления отклика любых фрагментов реальной РЭА в рамках адекватности квазистатического подхода. Предложена методика синтеза широкополосных моделей пассивных двухполюсных компонентов из RLC-элементов. По ней получены модели резистора, конденсатора, индуктивности в виде эквивалентной схемы, пригодные для анализа ЭМС в диапазоне частот до 40 ГГц. Предложенная методика позволяет получать многорезонансные модели заданной точности для любых пассивных двухполюсных компонентов, тем самым обеспечивая виртуальные испытания РЭА до частот, заданных стандартами по ЭМС. Приведены методика и алгоритм определения частотной зависимости ϵ_r двухсторонне фольгированных материалов. Выявлена высокая чувствительность метода к точности определения частот резонансов. Показано, что погрешность измерения увеличивается с уменьшением размеров резонатора. Для трех резонаторов на FR-4 показаны хорошее совпадение в пересечении диапазонов частот (844–1975 МГц) и выявление нефизичных выбросов. Частотная зависимость ϵ_r аппроксимирована полиномом пятой степени. Указанные результаты позволяют получить аналитическую математическую модель частотной зависимости ϵ_r любых диэлектрических материалов печатных плат. Разработаны методики предварительного анализа и имитационного моделирования ЭМС печатных узлов бортовой РЭА КА. Методика предварительного анализа апробирована разработкой рекомендаций

для 5 реальных УЭМ разработки ОАО «ИСС». Разработанные методики использовались в хоздоговорных НИОКР и учебном процессе.

2. Предложена технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках за счет оптимального выбора параметров проводников и диэлектриков: диэлектрического покрытия печатной платы и параметров меандровой линии. Уменьшение взаимовлияний за счет диэлектрического покрытия печатных плат позволяет уменьшать разность погонных задержек мод в трассах печатных плат МПЛП и, как следствие, минимизировать модальные искажения и уровень перекрестных наводок. Выявлено, что для многопроводных микрополосковых структур существует оптимальная толщина покрытия, которое уменьшает модальные искажения и дальнюю перекрестную наводку при всех рассмотренных вариантах воздействий в 2–24 раза. Сформулированы условия уменьшения влияния модальных искажений на форму импульса и разложения импульса в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением. Показана достаточность вычисления разности погонных задержек мод без вычисления временного отклика. Примечательно, что полезный эффект за счет выбора толщины лака может достигаться для всех сигнальных трасс платы практически без увеличения массы бортовой РЭА КА. Кроме того, возможно избирательное нанесение дополнительного диэлектрического слоя на критичный участок трасс платы. Указанные результаты дают возможность нетрадиционного использования влагозащитного покрытия для уменьшения взаимовлияний в проектируемой печатной плате, а также в изготовленном печатном узле, без его повторной компоновки и трассировки, а лишь нанесением покрывающего диэлектрического слоя в необходимых местах. При этом большой объем имитационного моделирования для поиска оптимальных мест и параметров покрытия может быть резко сокращен за счет выявленной специфики характеристик. Уменьшение искажений импульсного сигнала в сигнальных проводниках печатных плат посредством оптимального выбора параметров меандровой линии из одного витка выполняется за счет уменьшения влияния потерь на импульсные сигналы в проводниках печатных плат посредством коррекции формы импульсного сигнала. Запатентована линия задержки, которая обеспечивает прохождение импульсного сигнала без искажения его формы. Данное решение позволит увеличить пропускную способность линий передачи печатных плат РЭА за счет совершенствования массово используемых меандровых линий.

3. Предложена технология модальной фильтрации, основанная на разложении сигнала в линиях передачи. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования модальной фильтрации. Получены формулы: для амплитуд напряжения импульсов разложения в проводниках согласованной МПЛП; связывающие число и параметры отрезков для разложения импульса с заданными параметрами; для вычисления коэффициента ослабления на каскад МФ. Предложено изготавливать печатные платы с интегрированной модальной защитой. Представлены результаты одиночного и многокаскадного

использования МФ, а также их совместного использования с традиционными методами защиты. Показаны возможность и значимость использования модальной фильтрации для ослабления воздействия в форме ЭСР, а также возможность практически полного подавления затухающей синусоиды определенной частоты путем выбора соответствующей этой частоте длины МФ в бортовой РЭА КА. Выявлено, что широко распространенные плоские силовые кабели, наряду с основным назначением, можно использовать в качестве защиты от опасных импульсов, за счет их деления на импульсы меньшей амплитуды. Применение технологии позволит повысить устойчивость бортовой РЭА КА к воздействию помех по цепям питания и сигналов. Достоинства нового принципа, позволяющие повышение помехозащищенности, надежности, радиационной стойкости, уменьшение массы бортовой РЭА КА: отсутствие специальных защитных компонентов; возможность интегрированной реализации только за счет выбора параметров самого межсоединения; возможность реализации принципа на различных уровнях (печатный компонент, кабель, блок); возможность отказа от других средств защиты, их упрощения, а также улучшения работы за счет использования этого принципа; эффективная защита на высоких частотах. Таким образом, разработаны теоретические основы новой технологии помехозащиты (названной модальной фильтрацией), на основе которой могут быть созданы новые и усовершенствованы существующие способы и устройства для помехозащиты различных структурных уровней РЭА.

4. Технологию модального разложения и восстановления, кратко называемую модальным воздействием, предложено использовать для выявления скрытых возможностей модального разложения и последующего восстановления импульсных или гармонических сигналов помех опасной амплитуды в структурах бортовой РЭА КА. Сформулировано условие восстановления импульса в конце структуры из произвольного числа отрезков линий передачи. Разработана методика поиска структур, имеющих скрытые модальные воздействия и приводящих к перенапряжению и отсутствию срабатывания защитных компонентов. Показано, что в структурах связанных линий печатных плат бортовой РЭА КА, в зависимости от расстояния между сигнальными проводниками и близости их к опорному, может меняться знак разности задержек четной и нечетной мод, а значит, модальное воздействие (при импульсном и гармоническом сигналах) может иметь место в печатных платах (даже без учета распространения сигнала в подключаемых кабелях). Таким образом, выявлена новая возможность проникновения нежелательных воздействий в различных видах многопроводных межсоединений кабелей и печатных плат, минуя защитные приборы, обнаружен широкий круг способствующих этому структур (антиподов) и предложена методика их поиска.

5. Описан широкий ряд патентов и заявок на них. Результаты моделирования, использованные для обоснования возможности получения технического результата в описанных заявках, получены с помощью программно реализованных алгоритмов из гл. 2, идеи многих заявок используют модальные

технологии, предложенные в гл. 3, а принцип работы большинства заявленных устройств представлен в гл. 4. Проведена объемная работа по патентованию разнообразных способов (трассировки, компоновки, резервирования) и устройств (защиты, воздействия, линий задержки, МПЛ), полученных в работе: 3 полезных модели, 7 изобретений, 28 заявок на изобретение, а также получению 26 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Полученные результаты интеллектуальной деятельности свидетельствуют о новизне и широком практическом использовании результатов диссертационной работы.

Таким образом, в работе, на основании выполненных автором исследований, решена научная проблема разработки моделей, алгоритмов, методик, технологий и устройств для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата, имеющая важное хозяйственное значение.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи: моногр. / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.

2. Заболоцкий А.М. Импульсные сигналы в многопроводных линиях передачи. Методы, алгоритмы и программы для анализа многопроводных линий передачи и способы уменьшения искажений импульсных сигналов в них: моногр. – Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 164 с.

3. Самотин И.Е. Кабельные и полосковые модальные фильтры. Модальное разложение импульса в кабельных и полосковых структурах и разработка устройств защиты на его основе: моногр. / И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 208 с.

4. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: моногр. / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

5. Совершенствование моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов: моногр. / В.К. Салов, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, П.Е. Орлов, Р.С. Суровцев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 131 с.

6. Калимулин И.Ф. Методики и модели для учёта паразитных параметров печатных узлов при анализе электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов: моногр. / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2015. – 160 с.

Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК

1. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – №11. – С. 18–22.
2. Компьютерное моделирование сложных структур проводников при проектировании телевизионно-вычислительных систем / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – №10. – С. 63–66.
3. Заболоцкий А.М. Искажения импульсного сигнала в простых меандровых линиях / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – Т. 4. – №3. – С. 34–38.
4. Заболоцкий А.М. Разложение и восстановление импульса в линиях передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – №11. – С. 4–7.
5. Заболоцкий А.М. Уменьшение дальней перекрестной помехи в печатных платах нанесением лака / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Технологии ЭМС. – 2006. – №4. – С. 36–39.
6. 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.
7. Заболоцкий А.М. Исследование искажений импульсного сигнала в меандровых линиях печатных плат / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2007. – №3. – С. 21–24.
8. Использование плоского силового кабеля как защитного устройства от сверхкоротких импульсов / И.Е. Самотин, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Р.В. Киричек // Доклады ТУСУР. 2010. №1(21), ч. 2. – С. 74–79.
9. Заболоцкий А.М. Модальный фильтр с TVS-сборкой для защиты сети Fast Ethernet / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. 2010. №2(22), ч. 2. – С. 160–164.
10. Разработка конструкции и технологии изготовления макетов модальных фильтров для сети Fast Ethernet / О.М. Кузнецова-Таджибаева, Л.Н. Жеребцова, В.В. Пospelov, Д.В. Дроздов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин, С.В. Пономарев // Доклады ТУСУР. 2010. №2(22), ч. 2. – С. 164–169.
11. Бевзенко И.Г. Модальные антиподы плоских трехпроводных кабелей / И.Г. Бевзенко, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – №11. – С. 71–74.
12. Заболоцкий А.М. Индуктивность цепи земля-питание в печатных платах бортовой аппаратуры космических аппаратов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – №11. – С. 11–15.
13. Заболоцкий А.М. Экспериментальные исследования разложения и восстановления электрических импульсов в структурах с различными

модальными антиподами / А.М. Заболоцкий, И.Г. Бевзенко, Т.Р. Газизов // Известия вузов. Физика. – 2011. – Том 54, №10. – С. 17–24.

14. Калимулин И.Ф. Импеданс низкочастотных пассивных компонентов бортовой аппаратуры в диапазоне до 20 ГГц / Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – №2. – С. 91–97.

15. Заболоцкий А.М. Модальный фильтр как устройство защиты бортовых вычислителей и блоков управления космических аппаратов от электростатического разряда / А.М. Заболоцкий, Е.С. Долганов, Т.Р. Газизов // Известия вузов. Физика. – 2012. – Том 55, №3. – С. 39–43.

16. Орлов П.Е. Новая концепция создания интегрированных датчиков для контроля электромагнитной обстановки в бортовой аппаратуре космического аппарата / П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №5. – С. 20–23.

17. Заболоцкий А.М. Использование гибкого печатного кабеля для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от высокочастотных кондуктивных помех / А.М. Заболоцкий, Е.С. Долганов, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №7. – С. 18–27.

18. Орлов П.Е. Экспериментальное подтверждение возможности бесконтактной диагностики многопроводных структур посредством модального зондирования / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Известия вузов. Физика. – 2013. – Том 56, № 6. – С. 44–47.

19. Газизов Т.Р. Частотный анализ модальных искажений и его применение в диагностике электрических соединений / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий // Известия вузов. Физика. – 2013. – Том 56, № 9. – С. 113–114.

20. Н.И. Базенков. Таблицы для возведения многочлена в степень / Н.И. Базенков, А.М. Заболоцкий // Нелинейный мир. – 2013. – №11. – С. 788–798.

21. Орлов П.Е. Применение квазистатического моделирования для анализа и верификации результатов натурального эксперимента при исследовании модальных явлений в многопроводных структурах / П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Том 11, № 4. – С. 75–83.

22. Заболоцкий А.М. Методика предварительного анализа электромагнитной совместимости унифицированного электронного модуля космического аппарата / А.М. Заболоцкий, В.К. Салов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, №6. – С. 41–46.

23. Салов В.К. Получение частотной зависимости диэлектрической проницаемости диэлектрика резонаторным методом / В.К. Салов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Том 57, № 6. – С. 134–136.

24. Совместный учёт паразитных параметров компонентов и монтажа при вычислении частотных характеристик пассивных цепей бортовой аппаратуры космических аппаратов / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2014. – № 3(33). – С. 27–35.

25. Орлов П.Е. Влияние длины и количества витков на задержку микрополосковой линии / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Том 13, №4. – С. 93–96.
26. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 41–44.
27. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
28. 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. 42–45.
29. Заболоцкий А.М. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 3(37). С. 36–41.
30. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / А.В. Носов, Р.С. Суровцев, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 3(37). С. 29–35.
31. Газизов Р.Р. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 153–156.
32. Дмитренко И.В. Анализ частотного отклика модального фильтра для подавления излучаемых эмиссий бортовой аппаратуры космического аппарата / И.В. Дмитренко, А.М. Заболоцкий // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 157–160.
33. Калимулин И.Ф. Синтез многорезонансных моделей пассивных компонентов для моделирования испытаний на электромагнитную совместимость в диапазоне частот до 40 ГГц / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №1. – С. 88–96.
34. Магистерская программа ТУСУРа «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов, В.К. Салов // Технологии ЭМС. – 2016. – №1(56). – С. 24–33.

Статьи в зарубежных журналах

1. Zabolotsky A.M. Experimental results on UWB pulse propagation in low-voltage power cables with different cross sections / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 54, № 1. – P. 229–231.

2. Zabolotsky A.M. Simulation of ultrawide band pulse propagation in asymmetrical modal filter for power network protection / A.M. Zabolotsky, A.T. Gazizov // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2015. – Vol. 9. – P. 68–74.

Патенты на изобретения и полезные модели

1. Пат. № 79355 РФ. Модальный фильтр / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др. (РФ). – № 2008127527/22 (033781); заявл. 07.07.2008; опубл. 27.12.2008, Бюл. №36.

2. Пат. № 79213 РФ. Устройство воздействия на аппаратуру / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др. – №2008127574/22 (033 831); заявл. 07.07.2008, опубл. 20.12.2008, Бюл. №35.

3. Пат. № 800100 РФ. Устройство модального зондирования / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др. – № 2008127580/22 (033837); заявл. 07.07.2008; опубл. 20.01.2009, Бюл. №2.

4. Пат. № 2386964 РФ. Устройство обнаружения, идентификации и диагностики многопроводных линий передачи / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др. – № 2009108905/28(011919); заявл. 10.03.2009; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 11.

5. Пат. № 2431912 РФ. Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др. – №2010108518/07(012013); заявл. 9.03.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. №29.

6. Пат. № 2431897 РФ. Устройство защиты от импульсных сигналов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, и др. – № 2010108520/07 (012016); заявл. 9.03.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. №29.

7. Пат. № 2456588 РФ. Устройство обнаружения импульсов в многопроводных линиях передачи // Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий. – № 2010152388/28; заявл. 21.12.2010, опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.

8. Пат. № 2556438 РФ. Линия задержки, неискажающая импульс // Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – № 2013159347/08; заявл. 30.12.2013, опубл. 10.07.2015

9. Пат. № 2568327 РФ. Меандровая линия с дополнительной задержкой // Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – № 2014108688; заявл. 05.03.2014, опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.

10. Пат. № 2584502 РФ. Микрополосковая линия со стабильной задержкой // В.К. Салов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий. – № 2013159316/08; заявл. 30.12.2013, опубл. 20.03.2016, Бюл. № 5.

Статьи в рецензируемых отечественных журналах

1. Калимулин И.Ф. Сравнение корпусов ПАВ-фильтров по электромагнитной наводке посадочного места / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №2. – С. 72–82.

2. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, С.П. Куксенко, П.Е. Орлов, В.К. Салов, И.Ф. Калимулин, Р.И. Аширбакиев, Р.Р. Ахунов, Р.С. Суровцев, М.Е. Комнатнов // Техника радиосвязи. – 2014. – №2. – С. 11–22.

3. Газизов Т.Р. Теоретические основы модальной фильтрации / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.

4. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куksenko, А.М. Заболоцкий, И.С. Костарев // Компьютерные учебные программы и инновации. М: ГОСКООРЦЕНТР, МФЮА, РУИ. – 2007. – №10. – С. 89–90.

Тезисы и доклады в трудах зарубежных конференций

1. 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.

2. Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC. Germany, Munich, 24–28 September, 2007. – 2007. – P. 273–276.

3. Zabolotsky A.M. Modal Decomposition of UWB Pulse in Power Cable Structures: Simple Experiment Showing Useful Possible Applications / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, I.E. Samotin, // Book of abstracts EUROEM 2008, Switzerland, Lausanne, 21–25 July, 2008. – 2008. – P. 62.

4. Simple and free mitigation of short pulse lightning effects by flat power cables / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, I.E. Samotin, A.O. Melkozerov // Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection. Italy, Cagliari, 13–17 September 2010. – 2010. – P. 993-1–993-3.

5. Design of printed modal filters for computer network protection / T.R. Gazizov, I.E. Samotin, A.O. Melkozerov, A.M. Zabolotsky // Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection. Italy, Cagliari, 13–17 September 2010. – 2010. – P. 1246-1–1246-3.

6. Evaluations of Protection Methods Using TVS-array and Modal Filter / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, A.O. Melkozerov, P.E. Orlov, I.G. Bevzenko, E.S. Dolganov, A.M. Zabolotsky // Book of abstracts EUROEM 2012. France, Toulouse, 2–6 July 2012. – 2012. – P. 106.

7. Improved design of modal filter for electronics protection / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, A.O. Melkozerov, P.E. Orlov, E.S. Dolganov // Proc. of 31-th Int. conf. on lightning protection. Austria, Vienna, 2–7 September 2012. – 2012.

8. Analysis of power dissipation in resistive terminations of single- and multistage modal filters / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, A.O. Melkozerov, P.E. Orlov, E.S. Dolganov // Proc. of 31-th Int. conf. on lightning protection. Austria, Vienna, 2–7 September 2012. – 2012.

9. New results on EMC simulation for space projects of TUSUR University / A. Melkozerov, A. Zabolotsky, P. Orlov, V. Salov, R. Ashirbakiev, R. Akhunov, S. Kuksenko, I. Kalimulin // Proc. of IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications. Italy, Pavia, 14–16 May 2014. – 2014. – P. 1–4.

10. Zabolotsky A.M. New approach to the power network protection against ultrawide band pulses / A.M. Zabolotsky, A.T. Gazizov // 2014 Int. conf. on Energy,

Environment and Material Science (EEMAS '14). Russia, Saint Petersburg, 23-25 September 2014. – 2014. – P. 104-107.

11. Ensurance and simulation of electromagnetic compatibility: recent results in TUSUR University / T. Gazizov, A. Melkozorov, A. Zabolotsky, S. Kuksenko, P. Orlov, V. Salov, R. Akhunov, I. Kalimulin, R. Surovtsev, M. Komnatnov, A. Gazizov // Int. conf. on Applied Physics, Simulation and Computers, Austria, Vienna, 15–17 March 2015. – 2015.

12. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov, R.S. Surovtsev, V.K. Salov, Eg.V. Lezhnin // Advances in Intelligent Systems Research. Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). Thailand, Phuket, 23–24 August 2015. – P. 1–8.

13. New Concept of Critical Infrastructure Strengthening / T. R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, P.E. Orlov, S. P. Kuksenko // Proc. of the 13th Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics. Greece, Rhodes, 23–29 Sept 2015. – 2015. – P. 1–3.

14. Kalimulin I. Application of CMA Evolution Strategy to Synthesis of Multi-resonance SPICE Models up to 20 GHz / I. Kalimulin, A. Zabolotsky, T. Gazizov, // 24th Conf. on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems, USA, San Jose, 25-28 October 2015. – 2015. – P. 1–3.

Тезисы и доклады в трудах отечественных конференций

1. Заболоцкий А.М. Модальные искажения импульсного сигнала в многопроводной линии передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности: материалы докладов 6-й всероссийской научно-практической конференции. Томск, 2–4 июня 2004 г. – 2004. – С. 125–128.

2. 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.

3. Заболоцкий А.М. Разложение и восстановление импульсного сигнала в последовательно соединенных отрезках многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности: материалы докладов 7-й всероссийской научно-практической конференции. Томск, 16–18 февраля 2005 г. – 2005. – С. 61–64.

4. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами для обеспечения ЭМС / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко // 6– Международный Симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сб. науч. докл. Санкт-Петербург, 21–24 июня 2005 г. – 2005. – С. 160–164.

5. Заболоцкий А.М. О влиянии диэлектрического заполнения и электрофизических параметров многопроводных линий передачи на

предельную скорость передачи сигналов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Электрофизика материалов и установок: сборник докладов научной конференции. Новосибирск, 2007. – 2007. – С. 69–74.

6. Заболоцкий А.М. Интегрированная защита и возможность ее реализации в помехозащищенных теплопроводных монтажных платах / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности: сборник материалов 9-й всероссийской научно-практической конференции. Томск, 15 февраля 2007 г. – 2007. – С. 23–26.

7. Заболоцкий А.М. Модальное зондирование – новый принцип зондирования многопроводных структур / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности: сборник материалов 9-й всероссийской научно-практической конференции. Томск, 15 февраля 2007 г. – 2007. – С. 27–30.

8. Возможности применения новых модальных явлений в целях электромагнитного терроризма и для защиты от него / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко и др. // 7-й Международный Симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сборник трудов. Санкт-Петербург, 26–29 июня 2007 г. – 2007. – С. 266–269.

9. 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 г. – 2007. – С. 258–260.

10. Заболоцкий А.М. Модальное воздействие в среде электромагнитного терроризма / А.М. Заболоцкий, Е.Н. Горин, // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: доклады международной 4-й научно-практической конференции. Томск, 31 октября–3 ноября 2007 г. – 2007. – С. 260–263.

11. Заболоцкий А.М. Распространение короткого импульса в плоских кабелях силового питания при различных граничных условиях на концах пассивного проводника / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин, Т.Р. Газизов // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч. техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полус». Томск, 10–11 апреля 2008 г. – 2008. – С. 67–69.

12. Бевзенко И.Г. Вариант антипода для кабеля марки АППВ-3×6 / Бевзенко И.Г., Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч. техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полус». Томск, 10–11 апреля 2008 г. – 2008. – С. 69–71.

13. Орлов П.Е. Использование модальных эффектов для диагностики многопроводных соединений / П.Е. Орлов, И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч. техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полус». Томск, 10–11 апреля 2008 г. – 2008. – С. 179–181.

14. Experimental results on ultra wide band pulse propagation in three-conductor power cables of flat and circular cross sections / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, I. E. Samotin // Int. Sib. Conf. on Control and Commu. (SIBCON–2009) Russia, Tomsk, 21–23 March 2015. – 2015. – P. 264–269.

15. Заболоцкий А.М. Разложение короткого импульса в отрезках кабеля силового питания при различных граничных условиях на концах пассивного проводника / А.М. Заболоцкий, Е.И. Самотин, Т.Р. Газизов // Материалы научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Томск, 29–30 сентября 2008 г. – С. 23–26.

16. Экспериментальное подтверждение модального разложения и восстановления импульса / А.М. Заболоцкий, И.Г. Бевзенко и др. // Материалы научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Томск, 29–30 сентября 2008 г. – С. 81–84.

17. Заболоцкий А.М. Учёт потерь и диэлектрического заполнения при исследовании дальней перекрёстной помехи в межсоединениях печатных плат / А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева, Т.Р. Газизов // Сб. науч. тр. «Электронные и электромеханические системы и устройства». Томск: Изд-во НТЛ. – 2011. – С. 540–547.

18. Гаврюшов М.В. Квазистатический анализ двухпроводного кабеля с учетом разброса геометрических параметров / М.В. Гаврюшов, А.М. Заболоцкий // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: сборник материалов научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева». Железногорск, 2011 г. – С. 91–93.

19. Смирнова М.К. Моделирование гибкого печатного кабеля и кабельного жгута в системе TALGAT / М.К. Смирнова, А.М. Заболоцкий // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: сборник материалов научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева». Железногорск, 2011 г. – С. 156–158.

20. Защита от кондуктивных помех на основе модальной фильтрации: состояние дел и перспективы / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, П.Е. Орлов, И.Г. Бевзенко, Е.С. Долганов, Р.И. Аширбакиев // 9-й Международный Симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сборник трудов. Санкт-Петербург, 13–16 сентября 2011 г. – С. 261–264.

21. Квазистатический анализ многопроводных электрических соединений в системе TALGAT / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Р.И. Аширбакиев // 9-й Международный Симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сборник трудов. Санкт-Петербург, 13–16 сентября 2011 г. – С. 265–268.

22. Заболоцкий А.М. Вычисление собственных значений и векторов для исследования модального разложения импульса в гибком печатном кабеле бортовой аппаратуры космического аппарата / Заболоцкий А.М., А.Т. Газизов //

VI общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос»: сборник трудов. Санкт-Петербург. 19-21 марта 2014 г. – С. 244–245.

23. Калимулин И.Ф. Синтез многорезонансных моделей пассивных электронных компонентов и моделирование на их основе LC-фильтра / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Печатный 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». 17–21 ноября 2014 г. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2014. – С. 392–395.

24. Kalimulin I. LC-filter Simulation using multi-resonance models of components at frequency range up to 40 GHz / I. Kalimulin, A. Zabolotsky, T. Gazizov // 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. Russia, Omsk, 21–23 May 2015. – 2015. – P. 1–3.

25. Surovtsev R. Pulse decomposition in the turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses / R. Surovtsev, T. Gazizov, A. Zabolotsky // 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. – Russia, Omsk, 21–23 May 2015. – 2015. – P. 1–5.

26. Gazizov A. UWB Pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions / A. Gazizov, A. Zabolotsky // 2015 Int. Sib. Conf. Control. Russia, Omsk, 21–23 May, 2015. – 2015. – P. 1–3.

27. Газизов А.Т. Разложение сверхкороткого импульса в модальных фильтрах с лицевой и торцевой связью / А.Т. Газизов, А.М. Заболоцкий // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – С. 317–319.

28. Gazizov A.T. Printed structures for protection against UWB pulses / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, O.A. Gazizova // 16-th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. Novosibirsk State Technical University. Altai, Erlagol – 29 June – 3 July, 2015. – 2015. – P. 120–122.

29. Surovtsev R.S. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.M. Zabolotsky, A.V. Nosov // 16-th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. Novosibirsk State Technical University. Altai, Erlagol, 29 June – 3 July, 2015. – 2015. – P. 175-177.

30. Калимулин И.Ф. Синтез многорезонансных моделей компонентов для моделирования испытаний электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов: текущее состояние / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики», всероссийская молодёжная научно-практическая конференция. 5–6 июня 2015 г. Благовещенск. Тезисы докладов. – Самара: СГАУ, 2015. – С. 79–80.

31. Новая концепция повышения помехозащищённости цепей с резервированием бортовой аппаратуры космических аппаратов / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин // Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики», всероссийская молодёжная научно-практическая конференция. 5–6 июня 2015 г. Благовещенск. Тезисы докладов. – Самара: СГАУ, 2015. – С. 97–99

32. Калимулин И.Ф. Разработка целевой функции, учитывающей модуль и фазу частотно-зависимого параметра в задаче синтеза многорезонансных моделей пассивных электронных компонентов / И.Ф. Калимулин, А.М. Заболоцкий // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». 16–20 ноября 2015 г. Москва. Тезисы докладов. – М.: МАИ, 2015. – С. 413–415.

33. Заболоцкий А.М. Модальное разложение сверхкороткого импульса в многопроводных линиях передачи с круговой симметрией / А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов // Материалы XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 25–27 ноября 2015: В-Спектр, 2015. Ч. 2. С. 14–18.