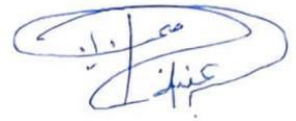


На правах рукописи



Алхадж Хасан Аднан Фаезович

**Модель и методики для оценки уровня электромагнитного излучения
печатных плат с модальным резервированием
и антенн с аппроксимацией проводной сеткой**

Специальность 2.2.13 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
Специальность 2.2.14 –
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

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, профессор,
заведующий кафедрой телевидения и
управления, ТУСУР

Официальные оппоненты –

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

Горбачев Анатолий Петрович,
доктор технических наук, доцент,
профессор ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический университет»

Ведущая организация –

АО «Самарское инновационное предприятие
радиосистем», г. Самара.

Защита состоится 28 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/7osktynw>

Автореферат разослан «___» ноябрь 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Жизнь современного общества характеризуется широким использованием радиоэлектронных устройств (РЭУ). Однако, для повышения надежности РЭУ, увеличивающихся в сложности, необходимо уделять большее внимание надежности их компонентов, в частности, печатных плат (ПП). Эффективным средством повышения надежности является резервирование (введение избыточности). Опыт показывает, что оно может применяться к отдельным элементам или схемам, а также сложным системам, используя резервирование замещением, когда часть средств способна выполнять необходимые функции, остальные же не активируются без необходимости. Сложные системы, такие как космические аппараты, подвергаются воздействию различных внешних факторов, классифицируемых как механические, климатические, космические, электромагнитные и радиационные воздействия. Внутренние факторы включают в себя электрические, тепловые и механические воздействия. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) также становится все более важной проблемой, особенно из-за сложности современных систем, которые работают в различных условиях. Существует новая методология, обеспечивающая ослабление электромагнитных помех и повышение надежности за счет резервирования. Использование электромагнитных взаимосвязей элементов с резервированием может помочь создать более помехозащищенные РЭУ. Это сложная задача, требующая комплексных исследований.

Антенны как элемент РЭУ используются в качестве элементарных излучателей и элементов антенных решеток. Они применяются как на земле, так и в космосе и должны обеспечивать определенные характеристики, но при этом быть недорогими и простыми в использовании. Активно разрабатываются системы передачи данных, требующие создания новых антенн. Эти тенденции побудили разработчиков к созданию новых методологий и подходов к проектированию антенн, которые позволят спроектировать оптимальную структуру, удовлетворяющую всем требованиям и ограничениям.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности РЭУ за счёт резервирования с учётом ЭМС, а также совершенствования проектирования отечественных РЭУ в части антенн.

Степень разработанности темы

Борьба с помехами в критичных системах актуальна, особенно с учетом преднамеренных помех, ставших отдельной темой международных симпозиумов по ЭМС. Исследования в этой области проводятся в различных секторах, включая академические и отраслевые исследования, а также ведущие научные школы и ученых из разных стран. Известны работы таких ученых в России, как Л.Н. Кечиев, С.А. Сухоруков, В.Е. Фортов, С.Ф. Чермошенцев и др., а также зарубежных, таких как J.L. ter Haseborg, F. Rachidi, W. Radasky, E. Schamiloglu, S. Tkachenko и др.

Модальное резервирование (МР), основанное на модальной фильтрации, представляет собой способ одновременной защиты от импульсных помех и повышения надежности РЭУ. Под руководством Т.Р. Газизова МР активно

исследуется. Однако, ранее исследования по МР фокусировались, главным образом, на кондуктивной эмиссии (по проводникам), тогда как излучаемая эмиссия (ИЭ) не исследовалась. Между тем это актуально, поскольку может дать дополнительное улучшение ЭМС.

Исследования по анализу и синтезу РЭУ с помощью вычислительной электродинамики ведутся во всём мире. Они нацелены на уменьшение вычислительных затрат при моделировании всё более сложных структур, обеспечивающих всё более высокие характеристики. Известны отечественные школы практической направленности: самарская, омская, красноярская, железногорская и др. В части моделирования известны школы А.Д. Григорьева, В.А. Неганова, Ю.В. Пименова, А.А. Самарского и др. Известны математические школы В.В. Воеводина, Х.Д. Икрамова, В.П. Ильина, Е.Е. Тыртышникова и др. Зарубежные прикладные научные школы представляют W.C. Chew, D. De Zutter, A.R. Djorjevic, T. Itoh, A. Glisson, R.F. Harrington, R.L. Haupt, R. Mittra, J.R. Mosig, A. Orlandi, Y. Rahmat-Samii, S. Rao, T.K. Sarkar, D.H. Werner, D. Wilton. Зарубежные математические школы по решению систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) представляют O. Axellson, M. Benzi, D. Bertaccini, J.W. Demmel, J. Dongarra, I.S. Duff, G. Golub, W. Hackbusch, N.J. Higham, Y. Saad, M. Tuma, H. Van der Vorst и др. Исследованию свойств проводной сетки посвящено много работ. Наиболее ранними из них являются труды Й. Фраунгофера (1823 г.), Г.Р. Герца (1889 г.) и А.А. Лампе (1898 г.). В России известны работы Г.Г. Гошина, Г.Г. Кравченко, С.И. Надененко и др. С тех пор рассматривались различные аспекты проводных сеток. Между тем ряд актуальных задач остался не решенным.

Цель работы – разработать модель и методики для оценки уровня ИЭ от ПП с МР и расчета характеристик антенн с аппроксимацией проводной сеткой.

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

1. Разработать алгоритмическую математическую модель для оценки уровня ИЭ от связанных проводников помехозащитных структур на ПП.
2. Выполнить экспериментальную оценку уровня ИЭ от ПП с МР, в том числе с учётом температуры.
3. Разработать методику проведения виртуальных испытаний на ИЭ от ПП с МР в ТЕМ-камерах.
4. Разработать методику для моделирования антенн проводной сеткой.

Научная новизна

1. Разработаны алгоритмическая математическая модель и методика виртуальных испытаний для оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием, отличающиеся использованием квазистатического подхода для уменьшения вычислительных затрат.

2. Впервые получены экспериментальные оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с одно-, двух- и трехкратным модальным резервированием, в том числе после отказов и при изменении температуры от минус 50°С до 150°С.

3. Предложена методика моделирования антенн с использованием тонкопроводной аппроксимации и метода моментов, отличающаяся наличием дополнительных рекомендаций для построения проводной сетки.

Теоретическая значимость

1. Раскрыты особенности влияния модального резервирования на излучаемую эмиссию от печатных плат.
2. Изучены причинно-следственные связи между температурой и излучаемой эмиссией от печатных плат с модальным резервированием до и после отказа их элементов.
3. Применительно к проблематике диссертации результативно использована разработанная алгоритмическая математическая модель, позволяющая вычислить напряженность электрического поля от печатных плат с модальным резервированием и от витка меандровой линии (МЛ).
4. Получены экспериментальные оценки излучаемой эмиссии для одно-, двух- и трехкратного модального резервирования.
5. Проведена модернизация методики расчёта характеристик антенн с использованием тонкопроводной аппроксимации и метода моментов.

Практическая значимость

1. Создана система практических рекомендаций по моделированию и испытанию печатных плат с модальным резервированием для оценки излучаемой эмиссии от них.
2. Определено влияние отказов на концах проводников печатных плат с модальным резервированием на уровень излучаемой эмиссии от них.
3. Определены пределы изменения уровня излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием при изменении температуры.
4. Создана система практических рекомендаций по моделированию антенн, аппроксимированных проводной сеткой, с меньшими вычислительными затратами и приемлемой точностью.
5. Получен патент на изобретение «Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием».
6. Результаты использованы при выполнении научных проектов, хозяйственных договоров и в учебном процессе (4 акта внедрения).

Методология и методы исследования. В работе применены математическое моделирование, основанное на методе моментов и модифицированном методе узловых потенциалов, квазистатический и электродинамический подходы, модальный анализ и натурный эксперимент на базе векторного анализатора цепей и климатической камеры.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование квазистатического подхода для оценки уровня излучаемой эмиссии от печатной платы с модальным резервированием позволяет ускорить эту оценку до 15 раз и провести виртуальное испытание платы в ТЕМ-камере на эмиссию.
2. Модальное резервирование способно уменьшать не только кондуктивную, но и излучаемую эмиссию от печатной платы с модальным резервированием.
3. Предложенная методика моделирования антенн проводной сеткой позволяет ускорить моделирование, по сравнению с методом конечных разностей

во временной области: до 6,2 раза для биконической антенны и 1,6 раза – для рупорной.

Достоверность результатов подтверждена сравнением результатов моделирования с результатами других программных продуктов и натурального эксперимента. Она основана на корректном использовании теории линий передачи и вычислительной электродинамики, а также согласованности результатов квазистатического и электродинамического подходов и измерений.

Использование результатов

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

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

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

4. Проект FEWM-2020-0041 «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования 2020–2022 гг.

5. Проект FEWM-2022-0001 «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, 2022–2023 гг.

6. СЧ НИР «Разработка математического обеспечения и программного модуля для моделирования радиотехнических характеристик антенного элемента», по договору ДП20221-60 от 15.04.2021 г., 2021 г.

7. СЧ НИР «Комплексные исследования в интересах создания ключевых элементов технологии расчета и измерения радиотехнических характеристик цифровых антенных решеток с учетом обтекателей для высокоскоростных летательных аппаратов», по договору ДП2022-78 от 27.06.2022 г., 2022–2024 гг.

8. Программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» ТУСУРа, подпроект 6 «Экспертная система для решения задач электромагнитной совместимости при автоматизированном проектировании элементов радиоэлектронных средств», 2021–2022 гг.

9. Учебный процесс бакалавриата радиотехнического факультета ТУСУР.

Апробация результатов. Результаты позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: РНФ (гранты 19-19-00424 и 20-19-00446 с их продлениями); госзаданий (проекты FEWM-2020-0041, FEWM-2022-0001, FEWM-2020-0039, FEWM-2023-0014); на включение в состав научно-

педагогического кадрового резерва ТУСУРа, 2021 г.; на назначение стипендий (Президента ТУСУРа в 2022 г., Президента и Правительства РФ студентам и аспирантам в 2022 г., Президента и Правительства РФ студентам и аспирантам по приоритетным направлениям в 2022 г.). Результаты докладывались на конференциях: Научная сессия ТУСУР, Томск, 2020, 2022, 2023 гг.; Электронные средства и системы управления, Томск, 2019, 2021, 2020 гг.; Перспективы развития фундаментальных наук, Томск, 2020, 2023 гг.; СИБРЕСУРС, Томск, 2020, 2021, 2022 гг.; САПР и моделирование в современной электронике, Брянск, 2021 г.; Интеграция образования, науки, бизнеса и власти, Томск, 2022 г.; Распространение радиоволн, Йошкар-Ола, 2023 г.; Микроэлектроника и информатика, Москва, 2023 г.; Нанотехнологии. Информация. Радиотехника, Омск, 2023 г.; Электроника и микроэлектроника СВЧ, Санкт-Петербург, 2023 г.; Техносферная и информационная безопасность, Тольятти, 2023 г.; Всерос. научно-инженерная конф. имени профессора А.И. Комиссарова, Москва, 2023 г.; Школа молодых новаторов, Курск, 2023 г.; Актуальные проблемы прикладной математики и механики, Джанхот, 2023 г.; EDM, Эрлагол (Алтай), 2020, 2021, 2022, 2023 гг.; SIBCON, Казань, 2021 г., Томск, 2022 г.; USBEREIT, Екатеринбург, 2022, 2023 гг.; APEDE, Саратов, 2022 г.; UralCon, Магнитогорск, 2022, 2023 гг.; Dynamics, Омск, 2022 г.; SIBIRCON, Екатеринбург, 2019, 2022 гг.; RusAutoCon, Сочи, 2023 г.; ICIE, Сочи, 2023 г.; PEAMI, Магнитогорск, 2023 г.; ICCT, Астрахань, 2023 г.; ADMInC, Санкт-Петербург, 2023 г.

Публикации. Основные результаты отражены в 89 публикациях (9 без соавторов): 6 статей в журналах из перечня ВАК; 5 статей в журналах, входящих в Q1/Q2 WoS или Scopus; 22 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 39 докладов в трудах других конференций; 14 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 3 патента на изобретение.

Личный вклад. Непосредственное участие автора в постановке цели и задач исследования. Результаты диссертационной работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии. Часть результатов по моделированию получена совместно с *Квасниковым А.А.*, *Клюкиным Д.В.*, *Нгуеном М.Т.* и *Куксенко С.П.*, а экспериментальному исследованию – с *Медведевым А.В.*, *Комнатовым М.Е.*, *Семенюком В.А.* и *Карри С.* Отдельные результаты получены совместно с соавторами публикаций. Обработка и интерпретация результатов выполнены лично автором.

Структура и объём: Диссертация включает введение, 5 разделов, заключение, список литературы из 279 наименований, приложение из 30 с. Объём с приложением – 214 с., в т.ч. 191 рисунок и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор по теме исследования

В подразделе 1.1 показана актуальность работ по надежности критических систем, контролю распространения сигналов и определению экстремальных условий в электронных системах. **В подразделе 1.2** выполнен обзор исследований по модальному резервированию, а **в подразделе 1.3** – по моделированию антенн проводной сеткой. Приведены квазистатическая

модель для отклика на концах сегментов многопроводной линии передачи (МПЛП) и электродинамическая модель для расчета токов в произвольной проводной структуре. В подразделе 1.4 сформулированы цель и задачи работы.

2. Вычислительная оценка излучаемой эмиссии от связанных проводников помехозащитных структур

В подразделе 2.1 разработана алгоритмическая математическая модель, полученная объединением моделей, использованных ранее в системе TALGAT. Она позволяет расчет тока на концах сегментов, на которые поделен отрезок МПЛП, вычисление напряженности электрического поля от каждого сегмента как элементарного излучателя и в результате получение диаграммы направленности (ДН) через векторный потенциал в дальней зоне. На основе данной модели созданы программы в системе TALGAT для оценки ИЭ от различных структур. С их помощью рассчитывается напряженность электрического поля из токов, полученных квазистатическим анализом. Выполнено широкое тестирование этой модели. Она состоит из 36 пунктов, сгруппированных в следующие разделы: создание геометрической модели поперечного сечения отрезков МПЛП; вычисление матриц первичных и вторичных параметров отрезков; создание эквивалентной схемной модели структуры; вычисление отклика структуры; вычисление токов в проводниках структуры, в том числе с учетом тока в опорных проводниках; вычисление напряженности поля. Результаты тестирования модели на двух связанных проводах над бесконечной землей в воздухе (рисунок 2.1) сравнивались с полученными электродинамическим анализом и дали близкие результаты по ДН и максимальным значениям суммарного поля (0,936 и 0,780 мВ/м) (рисунок 2.2). Распределения тока вдоль проводов показаны на рисунке 2.3а. Они очень близки по максимальным значениям для активного провода (отклонение $\pm 1\%$), но значительно отличаются для пассивного (отклонение $\pm 72\%$), из-за гораздо меньших значений и малости одного из них.

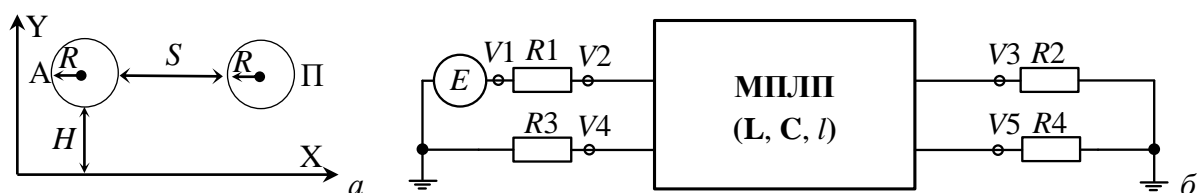


Рисунок 2.1 – Поперечные сечение (а) и принципиальная схема (б) двух связанных проводов над бесконечной землей в воздухе

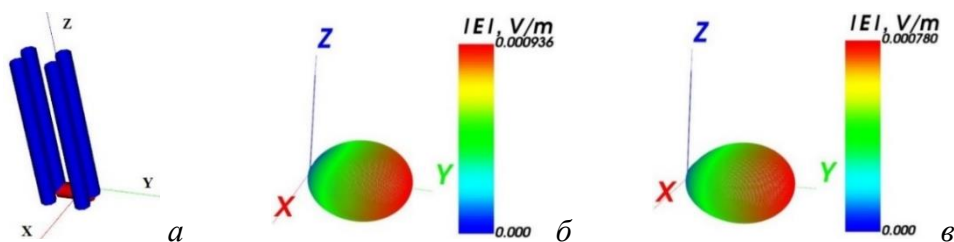


Рисунок 2.2 – Эквивалентное представление исследуемой структуры (а) и её ДН, вычисленные по предложенной модели (б) и электродинамическим анализом (в)

Для тестирования модели, сравнены её результаты с полученными другими методами для той же структуры. Использовались квазистатический анализ

по предложенной модели, электродинамический анализ методом моментов (МоМ) с тонкопроводной аппроксимацией и электродинамический анализ методом конечных элементов (МКЭ). Сравнение полученных ДН для напряженности электрического поля (рисунок 2.3б) показало близость результатов для ДН и максимальных значений суммарного поля (23,3, 20,5 и 25,4 мВ/м). Примечательно, что результаты квазистатического анализа оказались между результатами двух видов электродинамического.

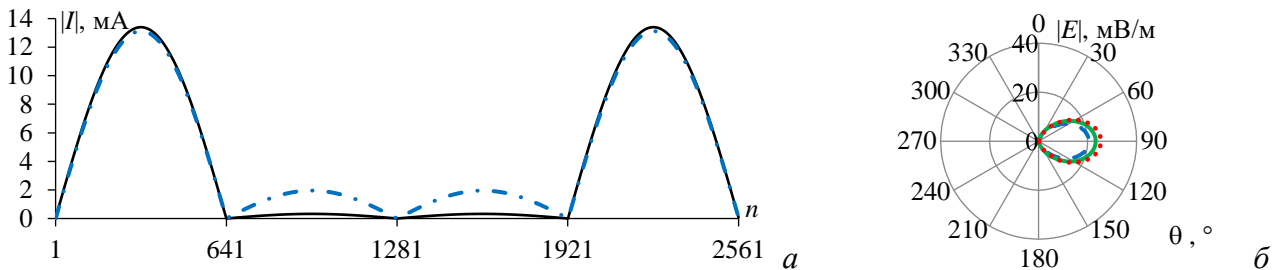


Рисунок 2.3 – Распределения тока в сегментах проводов, рассчитанные электродинамическим анализом (- - -) и по предложенной модели (-) (а).

ДН, полученные, используя МоМ (- - -), предложенную модель (-) и МКЭ (· · ·) (б)

В подразделе 2.2 модель опробована на витке МЛ из двух связанных проводов над плоскостью земли в воздушном диэлектрическом заполнении. Выявлено, что в МЛ, в отличие от ЛП, максимальный уровень ИЭ меньше почти во всем диапазоне частот, кроме резонансных. Оценки ИЭ МЛ получены с использованием двух подходов: квазистатического и электродинамического. На низких частотах результаты близки, в отличие от высоких, где различия существенны. Разница может быть обусловлена различием методов: электродинамический анализ основан на МКЭ, а квазистатический – на теории линий передачи. Выявлено, что квазистатический анализ не только дает приемлемые результаты по сравнению с электродинамическим, но и значительно снижает вычислительные затраты. Например, моделирование рассогласованной ЛП в системе TALGAT заняло менее 2 мин, а в системе EMPro – 30 мин.

В подразделе 2.3 выполнена тестовая оценка ИЭ одиночной и связанной МПЛ, имитирующих структуры без и с МР (рисунок 2.4). Сначала использовалась система EMPro, а потом TALGAT. На рисунке 2.5 для обеих структур представлены максимальные (во всем диапазоне обоих углов) значения $|E|$ и излучаемой мощности P_{Σ} . Из рисунка 2.6а видно, что при МР $|E|$ уменьшился практически во всем частотном диапазоне: максимум в 4,7 раза на частоте 9,3 ГГц. Из рисунка 2.5б также видно, что МР уменьшает излучаемую мощность: максимум в 56 раз на частоте 6,4 ГГц. Сравнены результаты EMPro и TALGAT. На рисунке 2.6 приведены максимальные $|E|$ для структуры с МР и без него для частот 0,5, 1, ..., 10 ГГц, показывающие, что МР уменьшает ИЭ. Применение модели дает достаточно близкие $|E|$, по сравнению с полученными электродинамическим анализом. Получены ДН в обеих системах на частоте 500 МГц (рисунок 2.7), показавшие, что МР уменьшает ИЭ на частотах от 0,1 до 10 ГГц. Это происходит за счет электромагнитной связи между резервируемым и резервирующим проводниками в неоднородной диэлектрической среде. При гармонической помехе её амплитуда

на определенных частотах может уменьшаться за счет того, что её четная и нечетная моды оказываются в противофазе. Поэтому токи, протекающие противофазно в этих проводниках, уменьшаются. Это приводит к уменьшению $|E|$ в дальней зоне на определенных частотах. На этих частотах можно ожидать уменьшения ИЭ, а также восприимчивости к излучаемым электромагнитным воздействиям. Между тем есть частоты или направления, где $|E|$ с МР выше, чем без него. Этот факт пока трудно объяснить однозначно, но он связан со сдвигом резонансов по частоте и перераспределением поля. Время моделирования в EMPro составило более 58 мин, а в TALGAT – около 4 мин. Так, предложенная модель не только дает приемлемые результаты по сравнению с электродинамическим анализом, но и снижает затраты времени: до 15 раз.

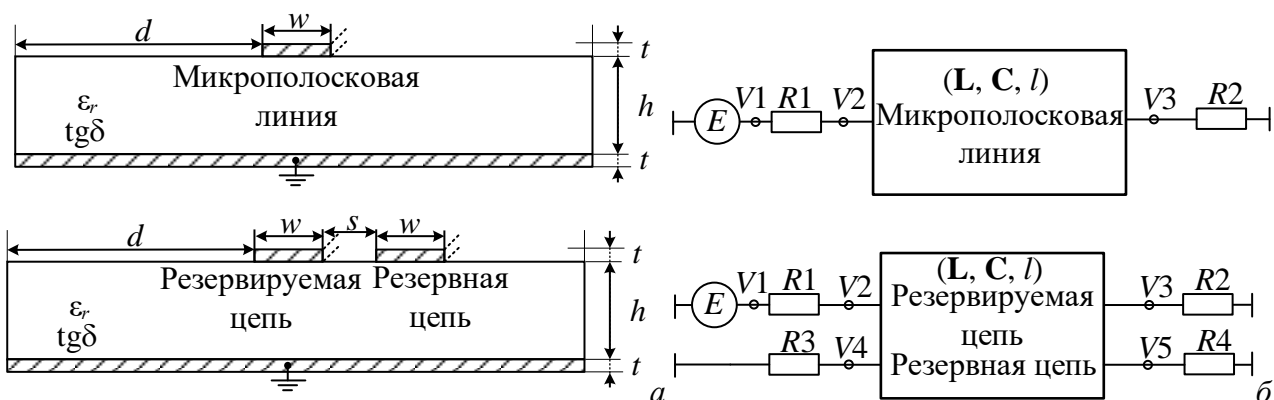


Рисунок 2.4 – Поперечные сечения (а) и эквивалентные схемы (б) моделируемых структур

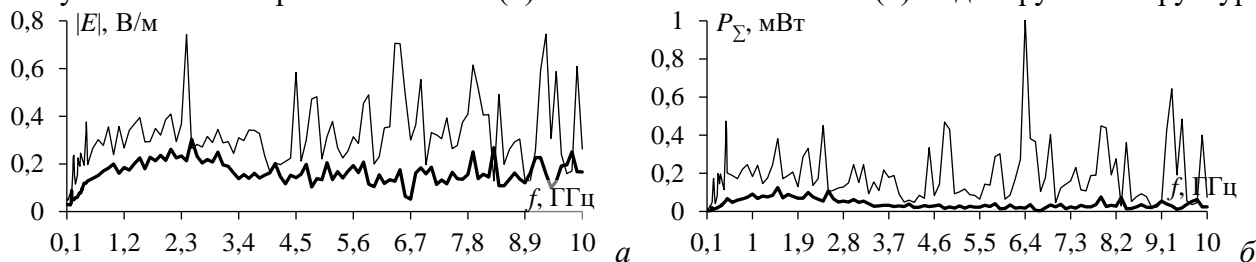


Рисунок 2.5 – Частотные зависимости максимальных (во всем диапазоне обоих углов)

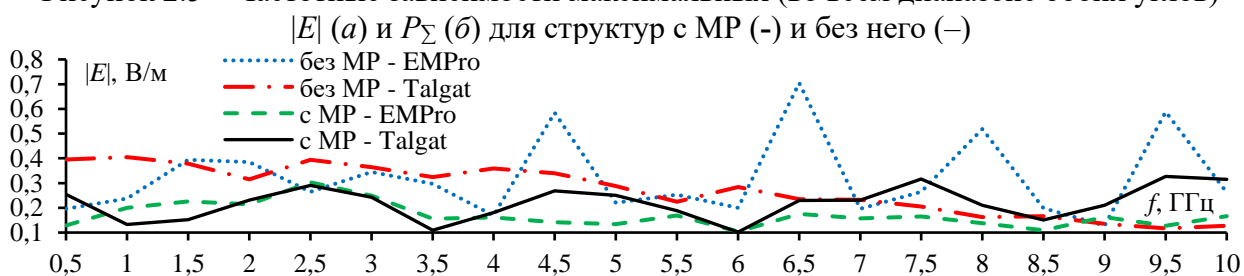


Рисунок 2.6 – Максимальные $|E|$ для структур с МР и без него, в зависимости от частоты, полученные в TALGAT и EMPro

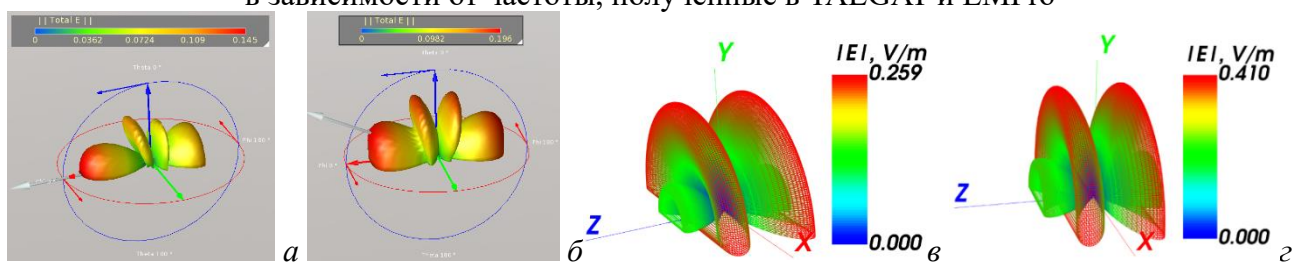


Рисунок 2.7 – ДН структур с (а) и без (б) МР, полученные в EMPro и в TALGAT (в, г)

3. Вычислительные и экспериментальные оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием

Здесь представлены результаты оценки ИЭ от цепей с МР на измерительных платах с использованием двух видов ТЕМ-камер, а именно классической (до 2 ГГц, $KCB < 1,22$, $E < 2$ кВ/м) и миниатюрной (до 5 ГГц, $KCB < 1,25$, $E < 6$ кВ/м). Используя их, можно оценить уровень ИЭ через напряженность электрического поля от ПП, поскольку он пропорционален амплитудам напряжения на концах центрального проводника (ЦП) камеры, рассчитанным из измеренных S -параметров.

В подразделе 3.1 представлены оценки ИЭ от макетов с однократным МР и без него (рисунок 3.1а). Они содержат одиночную и связанные МПЛ с различными граничными условиями на концах пассивного проводника (50 Ом на двух концах, КЗ и ХХ на одном из концов). Сначала измерены S -параметры с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) R&S ZVA 40 (4 порта). Порты 1 и 2 подключились к входу и выходу ПП, а 3 и 4 – к входу и выходу ЦП мини-ТЕМ-камеры (рисунок 3.2). При измерениях, ВАЦ использовался в качестве измерителя и генератора с выходной мощностью 0 дБм.

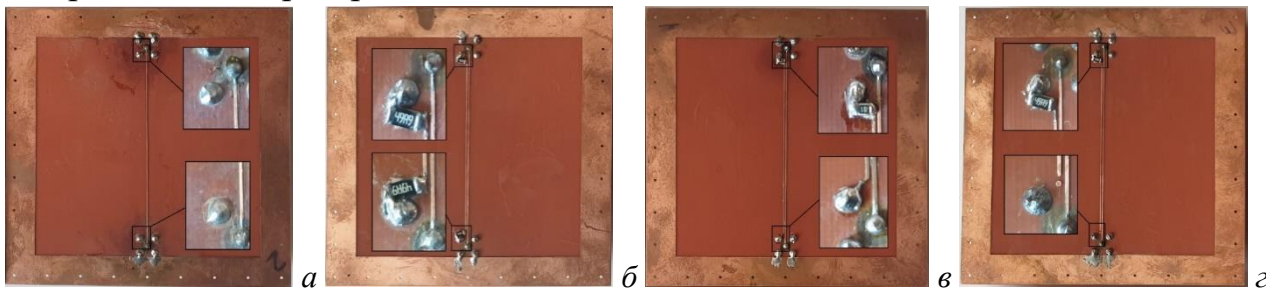


Рисунок 3.1 – Макеты измерительных ПП: одиночная МПЛ (а) и связанная МПЛ с различными граничными условиями (50 Ом (б), КЗ (в) и ХХ (z)) на концах пассивного проводника

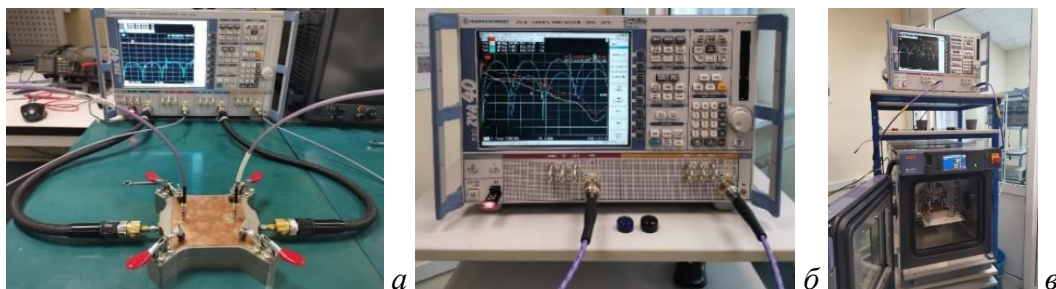


Рисунок 3.2 – Подсоединение портов ВАЦ к входу и выходу ЦП ТЕМ-камеры и к ПП (а). ВАЦ R&S ZVA 40 (2 порта) (б), мини-ТЕМ-камера внутри климатической камеры (в)

Частотные зависимости напряжения на ближнем и дальнем концах ЦП, для ПП с МР и без него, а также для МР с отказами в виде КЗ и ХХ, представлены на рисунке 3.3. Видно, что амплитуды напряжения для ПП с МР меньше, чем без МР, почти во всем диапазоне частот: на 20% и даже выше на некоторых частотах. Однако на входе ЦП камеры в диапазоне 3–3,8 ГГц и выше 4,5 ГГц амплитуда с МР выше, из-за сдвига резонансов по частоте. (Резкие скачки – из-за щели между ПП и ТЕМ-камерой). В целом, можно полагать, что МР способно уменьшить ИЭ при комнатной температуре в расширенном диапазоне частот до 5 ГГц.

Аналогичные измерения (рисунок 3.2) выполнены при температурах минус 50 и 150°С, при размещении макетов ПП вместе с мини-ТЕМ-камерой

в климатической (испытательной) камере тепла-холода ESPEC SU-262 (рисунке 3.4). Из них следует, что с ростом частоты уровень ИЭ от ПП без МР уменьшается с увеличением температуры в среднем на 25% и увеличивается с её уменьшением во всём диапазоне частот в среднем на 15%, кроме резонансных. Заметен также сдвиг резонансов на 50 МГц в сторону высоких частот с уменьшением температуры, и такой же в сторону низких частот с её увеличением, за счет изменения ϵ_r ПП и геометрических параметров ЛП. Таким образом, выводы для ПП без МР схожи с выводами для ПП с МР, но уровень уменьшения и увеличения, в среднем, на 5% выше, чем для ПП без МР. Сдвиг резонансов на 50 МГц с изменением температуры также остаётся, со сдвигом на 50 МГц в сторону низких частот от результатов для ПП без МР. Также видно изменение чувствительности к изменению температуры: разница в значениях зависимостей при минус 50°С для ПП с МР выше, чем для ПП без МР, и меньше – при 150°С. Однако амплитуды напряжения, в среднем, на 20% меньше, чем для ПП без МР, и особенно на дальнем конце.

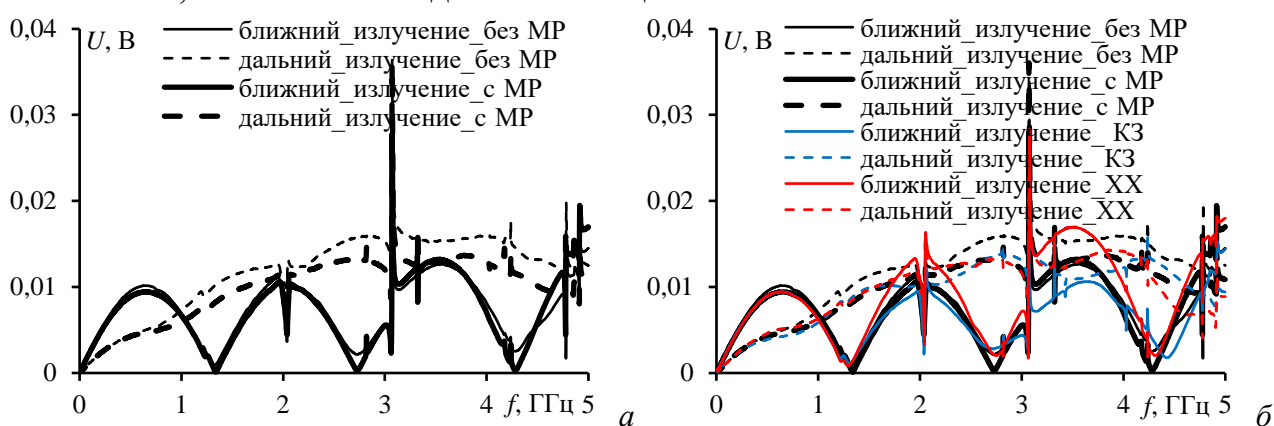


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости напряжения на ближнем и дальнем концах ЦП в мини-ТЕМ-камере для ПП с МР и без него (а) и для всех макетов (б)

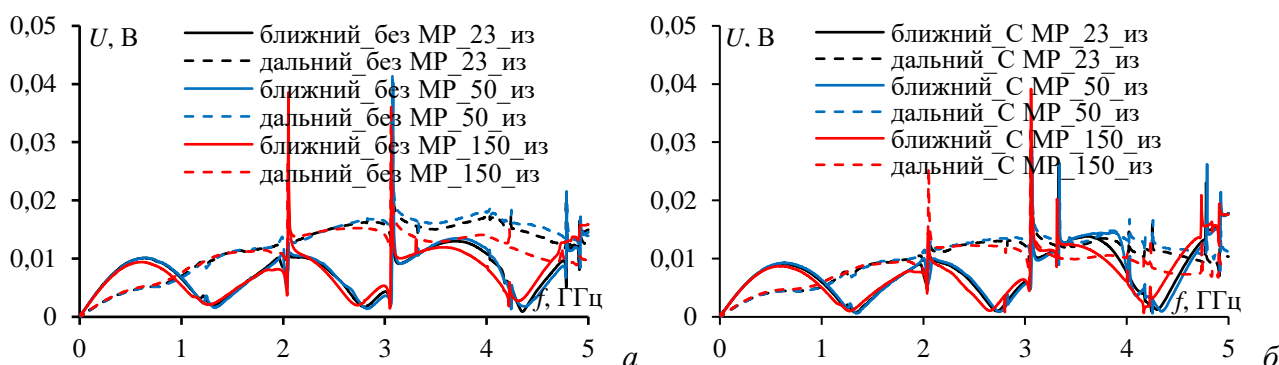


Рисунок 3.4 – Частотные зависимости напряжения на ближнем и дальнем концах ЦП в мини-ТЕМ-камере для ПП без МР (а) и с ним (б)

Для ПП с МР после отказов КЗ и ХХ результаты для дальнего конца ЦП при разных температурах представлены на рисунке 3.5. После отказов сдвиг резонансов не меняется. Также сохраняется поведение зависимостей при минус 50 и 150°С, но их чувствительность к изменению температуры повышается примерно на 10% при КЗ и снижается при ХХ. Амплитуды напряжения, в среднем, на 10% меньше, при КЗ, чем для ПП с МР, а выше – при ХХ, особенно на дальнем конце во всем диапазоне частот, кроме резонансных.

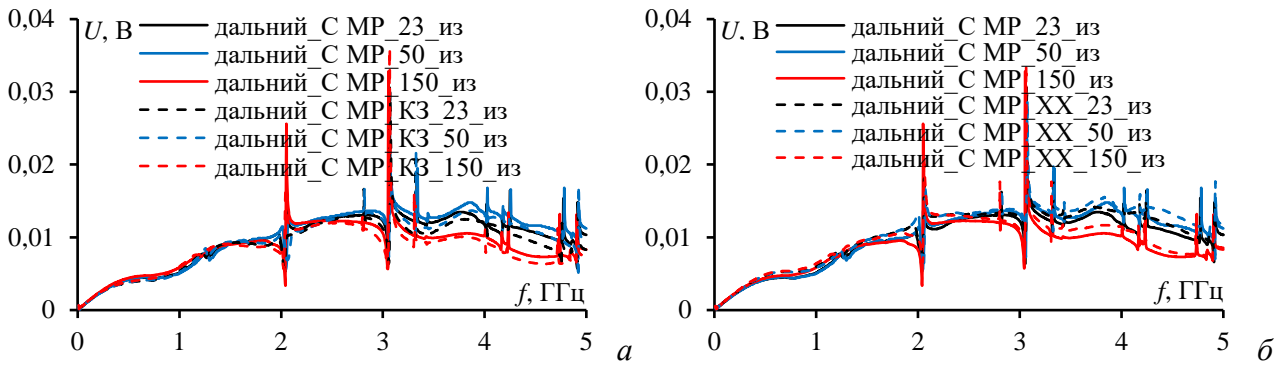


Рисунок 3.5 – Измеренные частотные зависимости напряжения для ПП с МР до и после отказов КЗ (а) и ХХ (б) на дальнем конце ЦП ТЕМ-камеры при разных температурах

Далее, рассмотрена связанная МПЛ длиной 6 см, имитирующая макет ПП с МР. Выполнено моделирование при $\epsilon_r=5,6$ с учетом потерь в проводниках и диэлектриках при $\text{tg}\delta=0,03$, изменяющемся в два раза при изменении температуры вниз и вверх. Вычисленные и измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ сравнены на рисунке 3.6. Видно, что результаты моделирования согласуются с измеренными, поскольку при изменении температуры зависимости сдвигаются в ту же сторону, а различия малы.

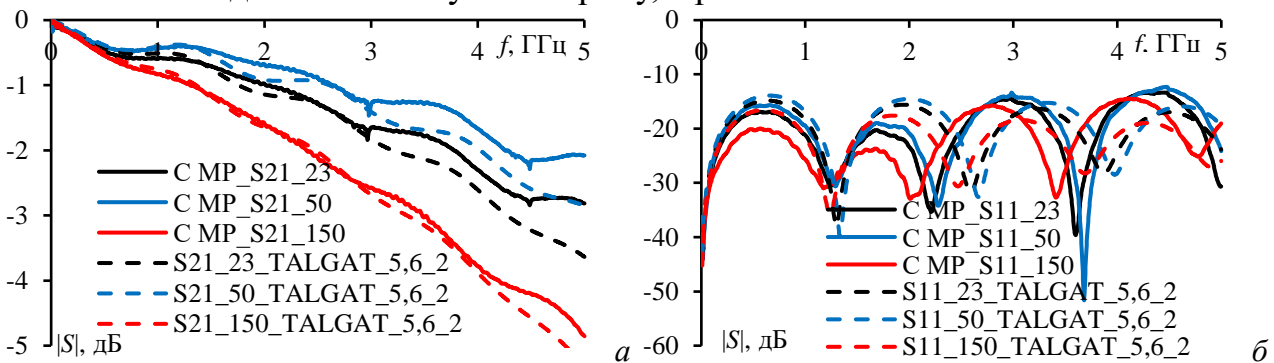


Рисунок 3.6 – Вычисленные и измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ (а) $|S_{11}|$ (б) для ПП с МР при разных температурах при $\epsilon_r=5,6$ с учетом потерь и изменением $\text{tg}\delta$ в 2 раза

В подразделе 3.2 представлены результаты оценки ИЭ от цепей с многократным МР на основе 3- и 4-проводных МПЛ на измерительных платах (рисунок 3.7) с использованием двух видов ТЕМ-камер. Макеты включают посадочные места для SMA соединителей на концах резервируемых и резервных электрических соединений

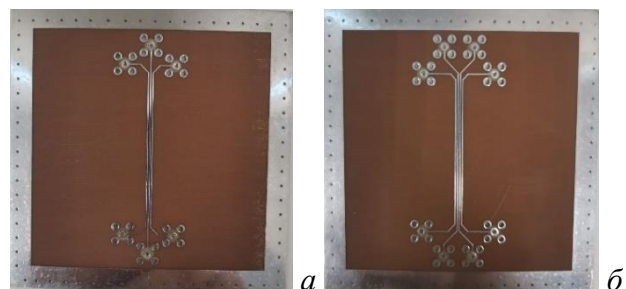


Рисунок 3.7 – 3- (а) и 4- (б) проводные МПЛ на измерительных платах

для реализации разных граничных условий на их концах. На основе измеренных S -параметров рассчитаны амплитуды напряженности электрического поля от макетов при разных вариантах граничных условий (оконечных нагрузок). Их выбор обоснован исследованием макетов с МР после разных отказов. Это позволило оценить эффективность применения многократного МР с учетом ИЭ даже после отказов. Анализ результатов показал, что с учётом уровней ИЭ от 3-проводной МПЛ с двукратным МР, рекомендуется выбирать активный проводник в центре среди двух пассивных, а 4-проводной, с трехкратным – по краям.

4. Виртуальные испытания на излучаемую эмиссию печатных плат с модальным резервированием

Здесь описано виртуальное испытание ПП с МР в ТЕМ-камере посредством квазистатического моделирования эксперимента в системе TALGAT и представлен новый способ однократного МР. В подразделе 4.1 моделировались ТЕМ-камеры и макеты печатных плат с и без МР, а в подразделе 4.2 – макеты внутри ТЕМ-камеры (рисунок 4.1). В подразделе 4.3 сравнены результаты моделирования в TALGAT и эксперимента (рисунок 4.2). Видно, что результаты моделирования и эксперимента близки, но есть сдвиг резонансов примерно в 1,5 раза. Он может быть связан с различием принятого в моделировании и реального значений ϵ_r , а также физических длин МПЛ и ЦП. В подразделе 4.4 представлено изобретение «Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР».

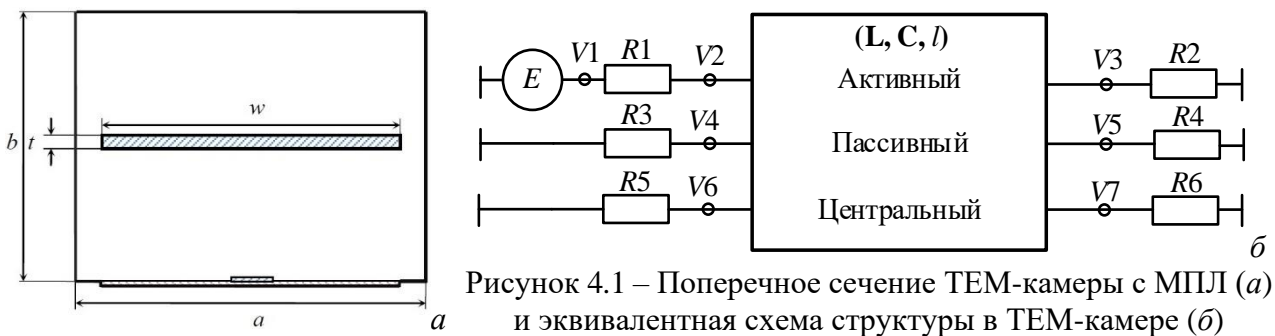


Рисунок 4.1 – Поперечное сечение ТЕМ-камеры с МПЛ (а) и эквивалентная схема структуры в ТЕМ-камере (б)

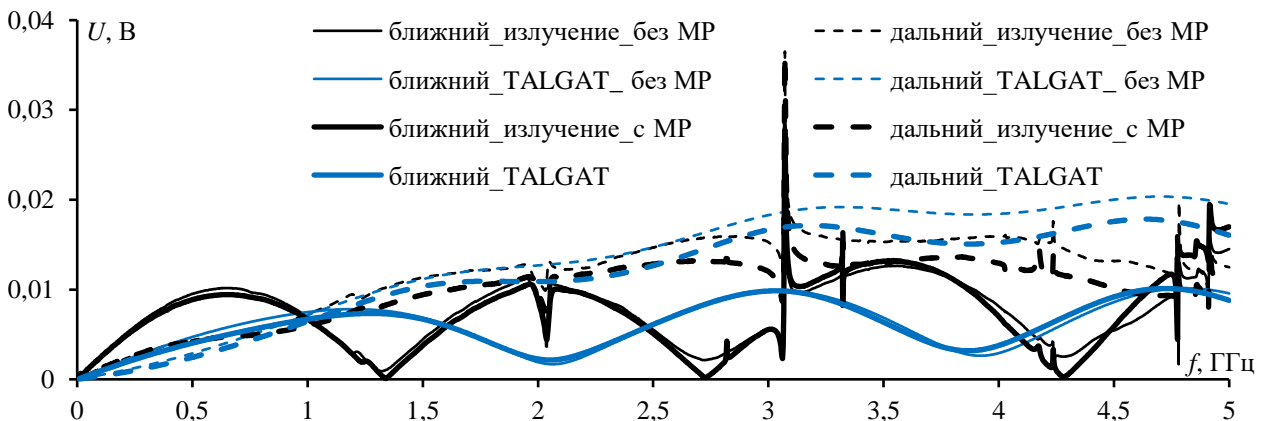


Рисунок 4.2 – Сравнение вычисленных и измеренных частотных зависимостей напряжения на ближнем и дальнем концах ЦП мини-ТЕМ-камеры для ПП с МР и без него

5. Методика моделирования антенн проводной сеткой

В подразделе 5.1 сформулированы рекомендации по использованию проводной сетки при моделировании антенн, а в подразделе 5.2 представлена модернизированная методика расчета их характеристик. В подразделе 5.3 приведены тестирование и апробация методики.

С помощью методики и программы Wire-Grid на её основе, моделировалась симметричная биконическая антенна на частотах 0,1, 0,5 и 1 ГГц (рисунок 5.1). Её характеристики сравнивались с аналогичными, полученными методом конечных разностей во временной области (МКВРО) в EMPro, и результатами других работ, полученными аналитически. На рисунке 5.3 сравнены вычисленные ДН в плоскости $\varphi = 0^\circ$. Получено хорошее совпадение по форме и амплитуде ДН. Исследовано влияние шага сетки (числа сегментов),

задаваемого как λ/n , на характеристики симметричной биконической антенны при $n = 10, 20, 40$. Рассчитаны значения её входного импеданса в Wire-Grid и EMPro и отклонения их модулей от полученных аналитически. Показано, что уменьшение шага сетки даёт значения, более близкие к аналитическим, при увеличении вычислительных затрат. ДН, полученные с помощью проводной сетки, близки к полученным аналитически. Рассчитаны максимальные различия нормированных ДН антенны, относительно аналитических значений. Приведены вычислительные затраты для расчёта характеристик антенны в Wire-Grid и EMPro. Моделирование в Wire-Grid оказалось быстрее до 6,2 раза, чем в EMPro.

По разработанной методике моделировалось рупорная антенна на частотах 8, 9 и 10 ГГц (рисунок 5.2). Результаты сравнивались с полученными в EMPro и измеренными для прототипа этого рупора. Показано, как уменьшение шага сетки влияет на ДН. Сравнены результаты нормированных ДН, полученных по методике и экспериментально (рисунок 5.4). Приведены рассчитанные и измеренные значения ширины главного лепестка и уровня боковых лепестков. Нормированные значения коэффициента усиления антенны также сравнивались с полученными в EMPro. Показано, что ДН, полученные с помощью проводной сетки в Wire-Grid, близки к полученным измерением и в EMPro. Время моделирования в Wire-Grid меньше до 1,6 раза, чем в EMPro.

Результаты подтвердили, что использование предложенных рекомендаций при моделировании рупорных и симметричных биконических антенн в составе методики позволяет получить достаточно точные результаты быстрее.

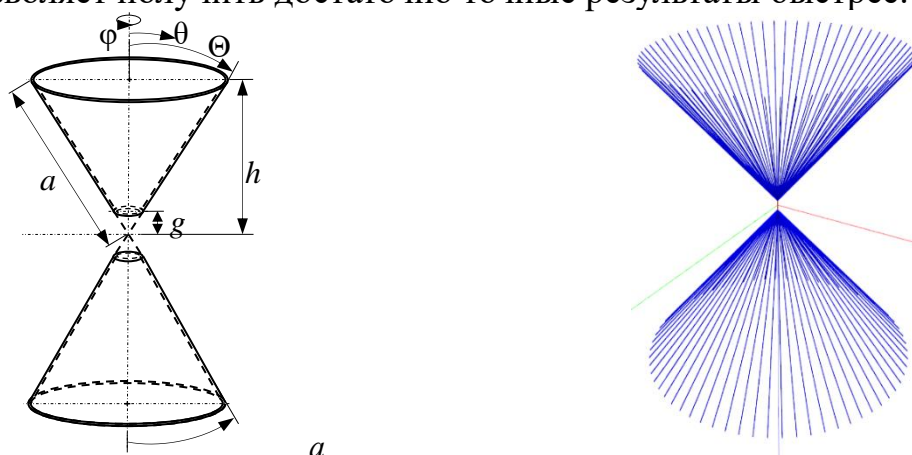


Рисунок 5.1 – Геометрическая модель (а) и расчетная сетка (б) биконической антенны

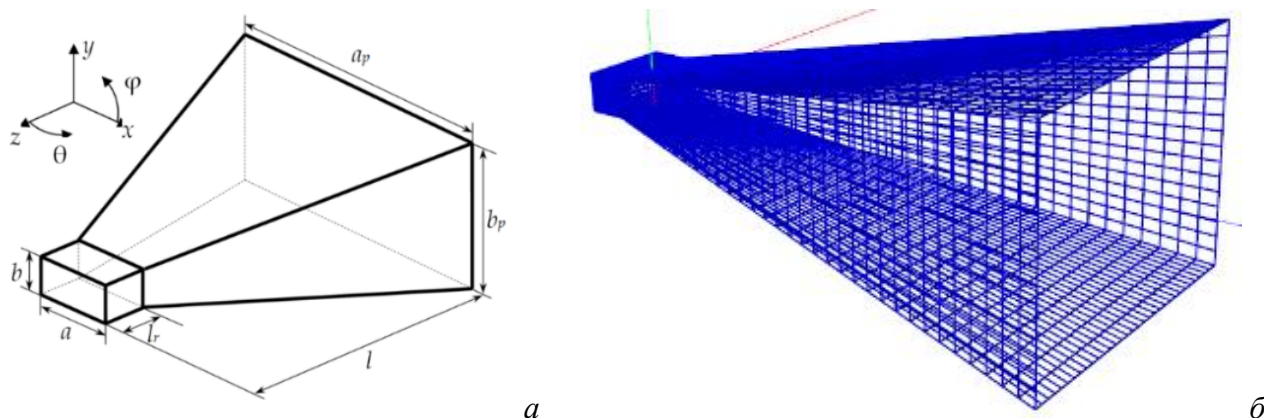
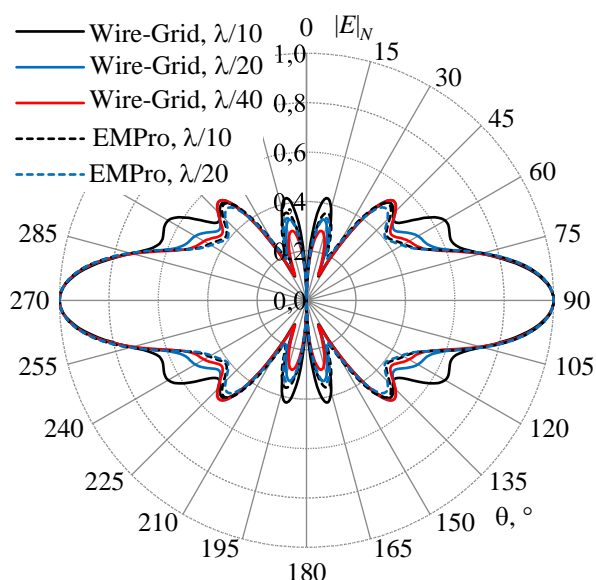
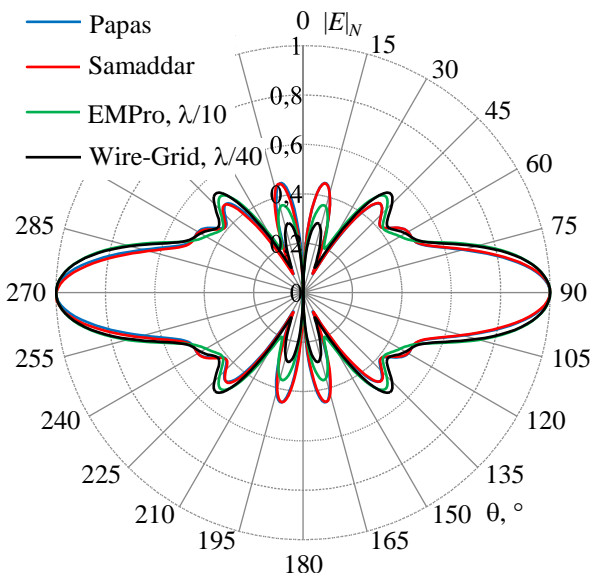


Рисунок 5.2 – Геометрическая модель (а) и расчетная сетка (б) рупорной антенны

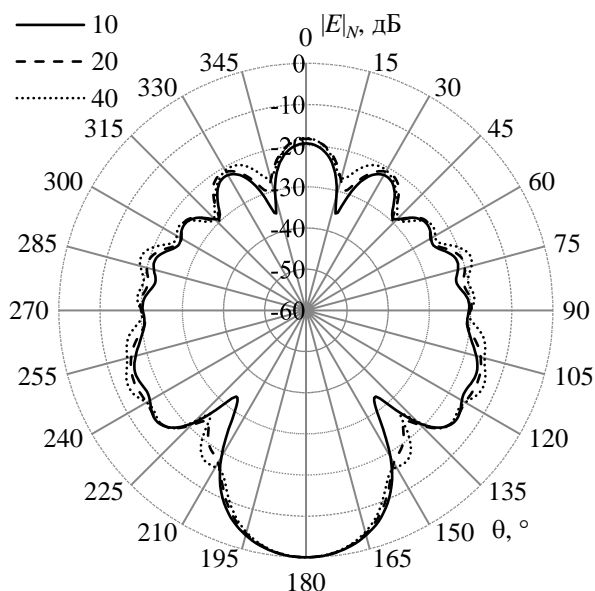


a

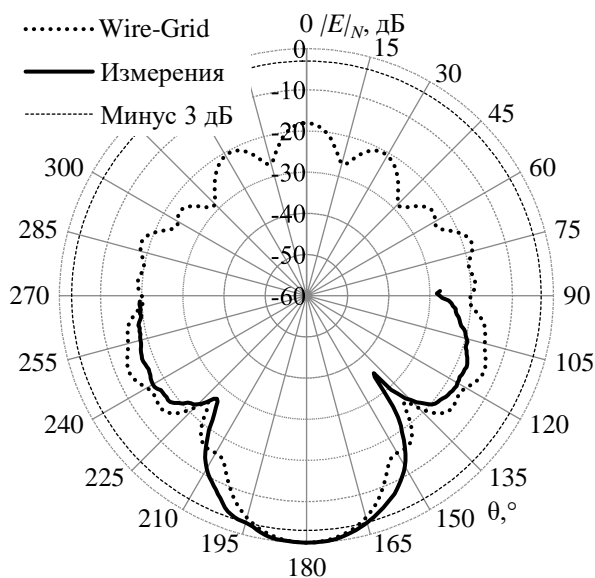


б

Рисунок 5.3 – Нормированные ДН симметричной биконической антенны на частоте 1 ГГц в плоскости $\varphi=0^\circ$, вычисленные при изменении шага сетки в Wire-Grid и EMPro и аналитически



a



б

Рисунок 5.4 – Нормированные ДН ($|E|_N$, дБ) рупорной антенны на частоте 8 ГГц в плоскости $\varphi=90^\circ$, вычисленные в Wire-Grid при $n=10, 20, 40$ (a) и измеренные (-) и вычисленные в Wire-Grid (··) (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги работы:

1. Разработана алгоритмическая математическая модель для оценки ИЭ от связанных помехозащитных структур, в том числе от ПП с МР и витка МЛ, отличающаяся использованием квазистатического подхода для уменьшения вычислительных затрат и учётом тока в обратном проводнике.

2. Показана возможность использования разработанной модели при решении задач ЭМС, в частности, при моделировании ИЭ от ПП с МР или витка МЛ, поскольку она способна дать не только приемлемые результаты по сравнению с электродинамическим подходом, но и значительно снизить вычислительные затраты. Например, моделирование рассогласованной ЛП в системе TALGAT заняло менее 2 мин, а в системе EMPro – 30 мин.

3. Впервые получены вычислительные и экспериментальные оценки ИЭ от ПП с однократным МР при изменении температуры.

4. Впервые получены экспериментальные оценки ИЭ от ПП с двух- и трехкратным МР. Анализ результатов показал, что с учётом уровней ИЭ для ПП 3-проводной МПЛ с двукратным МР, целесообразно выбирать активный проводник в центре, между двух пассивных, а для ПП 4-проводной МПЛ с трехкратным МР – по краям.

5. Предложена методика виртуальных испытаний на ИЭ от ПП с МР, отличающаяся моделированием ПП в ТЕМ-камере квазистатическим анализом.

6. Предложен способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР, отличающийся тем, что единый опорный проводник изготавливается в виде проводников на другой стороне ПП, причем торцы каждого опорного проводника располагаются под внешними торцами соответствующих резервируемого и резервного проводников.

7. Предложена методика моделирования антенн проводной сеткой с использованием тонкопроводной аппроксимации и МоМ, отличающаяся использованием предложенных правил для построения проводной сетки.

Рекомендации. Предложенные модель и программы целесообразно применять на ранних этапах проектирования ПП с МР для моделирования ИЭ от них. Они могут использоваться в рамках образовательного процесса, при выполнении различных НИР, а также в качестве основы для дальнейших исследований. Методику виртуальных испытаний и программы, целесообразно применять на ранних этапах проектирования ПП с МР для получения быстрых оценок ИЭ от них. Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР можно использовать при изготовлении ПП с МР для уменьшения изгиба ПП, массы ПП, восприимчивости цепей к внешней кондуктивной эмиссии и уровня кондуктивной эмиссии от них. Методику моделирования антенн проводной сеткой и программы, целесообразно применять на ранних этапах проектирования антенн для расчета их характеристик с меньшими вычислительными затратами и контролем точности.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Оценить ИЭ от ПП с двух- и трехкратным МР при изменении температуры. Расширение функциональных возможностей разработанных программ и оптимизация их работы, в том числе за счет создания графического интерфейса. Анализ поведения частотных характеристик напряженности электрического поля при оценке вычисленных и измеренных уровней ИЭ от структур с однократным МР в расширенном частотном диапазоне (до 18 ГГц). Определение возможности улучшения характеристик МР с учетом специфики поведения характеристик напряженности электрического поля, полученных при оценке ИЭ от структур с однократным МР в определенных диапазонах частот.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. **Хасан А.А.** Верификация моделирования проводных антенн методом моментов / А.А. Хасан, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 11.

2. **Алхадж Хасан А.** Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 37–51.

3. **Алхадж, Х.А.** Обзор исследований по модальному резервированию / Х.А. Алхадж, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 54–67.

4. **Алхадж Хасан, А.Ф.** Моделирование антенн методом моментов: аппроксимация поверхности проводниками / **А.Ф. Алхадж Хасан**, М.Т. Нгуен, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 51–71.

5. О моделях возбуждения антенн для расчета их входного импеданса методом моментов / Д.В. Клюкин, А.В. Демаков, А.А. Квасников, **А. Алхадж Хасан**, С.П. Куксенко // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2023. – №3.

6. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУРе / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Клюкин, **А. Алхадж Хасан**, А.Е. Максимов, А.В. Осинцев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9–1(119). – С. 170–178.

Статьи в журналах, входящих в Q1/Q2 WoS или Scopus

7. **Alhaj Hasan, A.** On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements / A. Alhaj Hasan, D.V. Klyukin, A.A. Kvasnikov, M.E. Komnatnov, S.P. Kuksenko // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, no. 7. – P. 1354.

8. **Alhaj Hasan, A.** Ensuring the reliability and EMC by modal reservation: a brief history and recent advances / A. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – P. 2466.

9. **Alhaj Hasan, A.** Wire-grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation, and future possibilities / A. Alhaj Hasan, M.T. Nguyen, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, no. 2. – P. 378.

10. **Alhaj Hasan, A.** On modeling antennas using MoM-based algorithms: wire-grid versus surface triangulation / A. Alhaj Hasan, A.A. Kvasnikov, D.V. Klyukin, A.A. Ivanov, A.V. Demakov, D.M. Mochalov, S.P. Kuksenko // Algorithms. – 2023. – Vol. 16, no. 4. – P. 200.

11. Zhechev, Y.S. New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber / Y.S. Zhechev, **А.Н. Adnan**, K.P. Malygin // IEEE Access. – 2022. – vol. 10. – P. 86663–86670.

Публикации в изданиях, входящих в базы WoS или Scopus

12. **Alhaj Hasan, A.** Approach to estimation of radiated emission from circuits with modal reservation / A. Alhaj Hasan, A. Kvasnikov, T.R. Gazizov // 2020 IEEE International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Chemal, Russian Federation. – 2020. – P. 169–173.

13. **Alhaj Hasan, A.** Comparing the estimates of the radiated emission from a structure with modal reservation by two approaches / A. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2021 IEEE International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Altai, Russian Federation. – 2021. – P. 145–148.

14. **Alhaj Hasan, A.** Estimation of the radiated emission from a single and coupled wires with insulation above the ground plane / A. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2021 IEEE International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Altai, Russian Federation. – 2021. – P. 149–152.
15. **Alhaj Hasan A.** Estimation of the radiated emission from a protective turn of a meander line in the air / A. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2021 IEEE International Siberian conference on control and communications (SIBCON), Kazan, Russian Federation. – 2021. – P. 1–5.
16. **Alhaj Hasan, A.F.** Studying the features of a PCB with modal reservation in the frequency domain using TALGAT / A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2022 IEEE Ural-Siberian conference on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russian Federation. – 2022. –P. 102–107.
17. **Alhaj Hasan, A.F.** Frequency characteristics of PCB with modal reservation before and after failure using TALGAT / A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2022 IEEE 23rd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM), Altai, Russian Federation. – 2022. – P. 140–146.
18. **Alhaj Hasan, A.F.** Measuring the level of radiated emissions from PCBs with modal reservation before and after failure / A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2022 IEEE International conference on actual problems of electron devices engineering (APEDE), Saratov, Russian Federation. – 2022. – P. 13–16.
19. **Alhaj Hasan, A.F.** TEM-cell measurements of the radiated emissions from PCBs with modal reservation before and after failure / A.F. Alhaj Hasan, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // 2022 IEEE International Ural conference on electrical power engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. – 2022. – P. 196–200.
20. **Alhaj Hasan, A.F.** Measuring frequency characteristic of PCBs with modal reservation under climatic impact before and after short circuit failure / A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2022 IEEE Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics), Omsk, Russian Federation. – 2022. – P. 1–6.
21. **Alhaj Hasan, A.F.** Measuring frequency characteristic of PCBs with modal reservation under climatic impact / A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2022 IEEE International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation. – 2022. – P. 1090–1094.
22. **Alhaj Hasan, A.F.** Measuring frequency characteristics of PCBs with modal reservation before and after open circuit failure under climatic impact / A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2022 IEEE International Siberian conference on control and communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation. – 2022. – P. 1–6.
23. **Hasan, A.A.** Wire grid sparse antennas: verification of a modified modeling approach / A.A. Hasan, T.M. Nguyen, T.R. Gazizov // 2023 IEEE Ural-Siberian conference on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russian Federation. – 2023. – P. 100–104.
24. Gazizov, T.R. A simple modeling methodology for creating hidden antennas / T.R. Gazizov, **A. Alhaj Hasan**, M.T. Nguyen // 2023 IEEE International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation. – 2023. – P. 1080–1084.

25. **Alhaj Hasan, A.** Novel MoM-based approaches for generating wire-grid sparse antenna structures / A. Alhaj Hasan, M.T. Nguyen, T.R. Gazizov // 2023 IEEE 24th International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation. – 2023. – P. 570–576.

26. **Alhaj Hasan, A.** Efficient sparse antenna design using MoM-WG: comparative study of horn, conical horn, and reflector antennas by advanced approximations / A. Alhaj Hasan, M.T. Nguyen, T.R. Gazizov // 2023 IEEE International Russian automation conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation. – 2023. – P. 709–715.

27. **Alhaj Hasan, A.F.** Experimental study on after failure radiated emissions of triple modal reservation circuits / A.F. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 IEEE International Russian automation conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation. – 2023. – P. 837–842.

Патенты

28. Патент на изобретение № 2794739 РФ, МПК Н 05 К 1/02, Н 04 В 15/00. Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием / **А. Алхадж Хасан**, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2022130296; заявл. 23.11.22; опубл. 24.04.2023, Бюл. № 12. – 6 с.

29. Патент на изобретение № 2752233 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной печатной плате для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев, **А. Алхадж Хасан**, О.М. Кузнецова-Таджибаева. – Заявка № 2020122274; заявл. 06.07.20; опубл. 23.07.2021, Бюл. № 21. – 8 с.

30. Патент на изобретение № 2754077 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев, **А. Алхадж Хасан**, О.М. Кузнецова-Таджибаева. – Заявка № 2020122269; заявл. 06.07.20; опубл. 26.08.2021, Бюл. № 24. – 8 с.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663568. Программа для оценки излучаемой эмиссии структуры с модальным резервированием / **А. Алхадж Хасан**, А.А. Квасников, Т.Р. Газизов. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.08.2021 г.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681597 РФ. Программа для моделирования антенн на основе тонкопроводной аппроксимации / Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, И.А. Онищенко, **А. Алхадж Хасан**, С.П. Куксенко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.11.2022 г.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683074 РФ. Оценка излучаемых эмиссий от печатной платы с модальным резервированием путём виртуальных испытаний в мини-ТЕМ-камере / **А. Алхадж Хасан**, А.А. Квасников, Т.Р. Газизов // Заявка №2022681828. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30.11.2022 г.