

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО
«СИП РС», д.т.н., профессор

Бузов А.Л.

2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации –

Акционерного общества «Самарское инновационное предприятие радиосистем» (АО «СИП РС»)

на диссертационную работу

Алхаджа Хасана Аднана Фаезовича на тему: «Модель и методики для оценки уровня электромагнитного излучения печатных плат с модальным резервированием и антенн с аппроксимацией проводной сеткой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

1. Вводные положения

Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Газизов Т.Р.

На отзыв ведущей организации были представлены:

- диссертация – 1 том, 214 листов;
- автореферат – брошюра, 1 усл. печ. лист.

2. Актуальность темы

Диссертация Алхаджа Хасана А. посвящена разработке модели и методик для оценки уровня излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием, а также развитию методов моделирования антенн на основе аппроксимации проводящей поверхности проволочной сеткой.

Обе поставленные задачи достаточно актуальны. В обоих случаях, прежде всего, речь идет о развитии методологии математического моделирования электродинамических систем в целях обеспечения эффективности, надежности, и электромагнитной совместимости радиотехнических систем, а также импортозамещения, в том числе в области технологий проектирования.

В прикладном аспекте, в первом случае ставится и решается актуальная техническая задача учета излучаемой эмиссии от печатных плат, содержащих цепи с модальным резервированием, как существенного фактора обеспечения ЭМС. Учет излучаемой эмиссии от полосковых структур, наряду с другими факторами возникновения внутриобъектовых помех, особенно важен при компактном размещении радиотехнических средств и их составных частей в составе полезной нагрузки космических летательных аппаратов, для которых многократное резервирование является важным способом обеспечения надежности и долговечности.

Актуальность второй задачи связана с потребностями снижения ресурсоемкости моделирования антенн, содержащих относительно протяженные проводящие поверхности, в том числе – апертурных.

Таким образом, актуальность темы диссертации Алхаджа Хасана А. представляется достаточно обоснованной.

3. Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы (278 наименований) и приложения.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, проанализирована степень разработанности темы, обозначены цель и задачи работы, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость и достоверность проведенного исследования, отражены апробация и внедрение работы, а также ее краткое содержание.

Раздел 1 посвящен обзору научно-технических достижений по теме исследования. Рассмотрены общие вопросы электромагнитной совместимости и резервирования. Выполнен обзор исследований по модальному резервированию, рассмотрены основные достоинства модального резервирования и его способы, обоснованы подходы к измерению уровня излучаемой эмиссии и выбор структур для ее исследования. Проанализированы вопросы использования квазистатических и электродинамических моделей, моделирования антенн проводной сеткой и моделирования многопроводных линий передачи. Обоснованы цель и задачи работы.

В разделе 2 рассмотрена вычислительная оценка излучаемой эмиссии от связанных проводников помехозащитных структур. Обоснована математическая модель для оценки излучаемой эмиссии от связанных проводников помехозащитных структур, проведено сравнение квазистатической и электродинамической оценок излучаемой эмиссии от одиночной и связанной проводных линий передачи, исследовано распределение тока вдоль двух связанных проводов над плоскостью земли в зависимости от их размеров, про-

ведена оценка излучаемой эмиссии от двух связанных проводов над плоскостью земли разными методами, исследовано влияние сегментации и согласования на ток в проводах, выполнена оценка излучаемой эмиссии от одиночного и связанных проводов с изоляцией над плоскостью земли. Проведена оценка излучаемой эмиссии от витка меандровой линии. Выполнена вычислительная оценка излучаемой эмиссии от структуры с модальным резервированием на основе различных моделей и проведено сравнение оценок.

В разделе 3 рассмотрены вычислительные и экспериментальные оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием. Исследованы макеты печатных плат с однократным модальным резервированием, проведены измерения излучаемой эмиссии от макетов в классической и мини-ТЕМ-камерах, исследованы зависимости параметров макетов от температуры, проведено сравнение результатов моделирования и измерений. Исследованы макеты печатных плат с многократным модальным резервированием на основе трех- и четырехпроводных микрополосковых линий.

Раздел 4 посвящен виртуальным испытаниям на излучаемую эмиссию печатных плат с модальным резервированием. Выполнено моделирование ТЕМ-камеры и макетов печатных плат с модальным резервированием и без него. Проведено сравнение и анализ результатов моделирования и измерений. Обоснован способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием.

В разделе 5 рассмотрена методика моделирования антенн проводной сеткой. Обоснованы рекомендации для моделирования антенн с использованием проводной сетки. Изложена методика расчёта характеристик антенн на основе аппроксимации поверхности проводной сеткой и метода моментов. Приведены результаты верификации методики.

В заключении сформулированы основные результаты работы и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении приведены копии актов внедрения, патентов, свидетельств и поощрительных документов.

4. Научная новизна результатов диссертационного исследования

По результатам изучения диссертации и доступных публикаций автора могут быть выделены следующие результаты исследований, обоснованно претендующие на научную новизну:

- математическая модель и методика виртуальных испытаний для оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием в целях обеспечения электромагнитной совместимости, отличающиеся сов-

местным использованием квазистационарного приближения и строгого электродинамического подхода для уменьшения вычислительных затрат.

- модернизированная методика моделирования антенн с использованием аппроксимации проводящей поверхности проволочной сеткой на основе модифицированного правила равной площади, обеспечивающая снижение ресурсоемкости моделирования;

- результаты расчетной и экспериментальной оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с одно-, двух- и трехкратным модальным резервированием, в том числе после отказов, в широком диапазоне температур.

5. Значимость для науки результатов диссертационных исследований автора

Разработанные в диссертации математическая модель и методика виртуальных испытаний для оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием в целях обеспечения электромагнитной совместимости и модернизированная методика моделирования антенн с использованием аппроксимации проводящей поверхности проволочной сеткой вносят вклад в развитие методологических основ проектирования радиотехнических и антенных устройств.

Полученные результаты расчетной и экспериментальной оценки излучаемой эмиссии от печатных плат с одно-, двух- и трехкратным модальным резервированием расширяют знания о характеристиках радиотехнических устройств, относящихся к обеспечению электромагнитной совместимости.

Диссертационная работа содержит **значимые научные результаты по заявленным специальностям** 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (п.7 паспорта специальности: «Разработка и исследование методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, включая системы связи и телевидения, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному и ионизирующему излучению, методов разрушения и защиты информации в этих системах») и 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (п.9 паспорта специальности: «Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения»).

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются адекватностью использованных методов, расчетных моделей и программных средств. Достоверность результатов работы подтверждается сравнением результатов моделирования с результатами, полученными с использованием других программных продуктов, а также с результатами натурального эксперимента.

6. Практическая значимость результатов диссертационных исследований автора

Практическая значимость определяется возможностями непосредственного использования при разработке и испытаниях изделий:

- практических рекомендаций по моделированию и испытанию печатных плат с модальным резервированием для оценки излучаемой эмиссии от них;
- практических рекомендаций по моделированию антенн, аппроксимированных проводной сеткой, с меньшими вычислительными затратами и приемлемой точностью;
- результатов оценки влияния отказов на концах проводников печатных плат с модальным резервированием на уровень излучаемой эмиссии от них;
- результатов оценки пределов изменения уровня излучаемой эмиссии от печатных плат с модальным резервированием при изменении температуры.

Практическая значимость результатов работы подтверждается наличием патентов на изобретения, свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, а также успешным внедрением при выполнении НИР и государственных заданий.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Основные положения и выводы диссертационной работы, в силу отмеченной выше научной и практической значимости отдельных результатов, могут найти применение:

- в заказывающих управлениях и научно-исследовательских организациях Минобороны РФ, ФСО РФ, ФСБ РФ, Минпромторга РФ, Минобрнауки РФ, ГК «Роскосмос» и других Государственных заказчиков, при разработке тактико-технических (технических) заданий на НИОКР по созданию радиотехнических устройств различного назначения на основе печатных и полосковых плат в части, относящейся к требованиям надежности, долговечности и радиоэлектронной защиты;
- на научно-производственных предприятиях госкорпораций «Ростех», «Роскосмос», «Росатом» и других, специализирующихся в области разработки радиотехнических устройств на основе печатных и полосковых плат, в том числе с модальным резервированием, в форме непосредственного использования решений и рекомендаций при разработке и испытаниях изделий;

- в учебном процессе образовательных учреждений высшего образования России по соответствующим направлениям подготовки бакалавров, специалистов, магистров и аспирантов.

Рекомендуется продолжение работ по тематике исследований, в том числе в направлении повышения эффективности модальной фильтрации.

8. Замечания

1) Автору не удалось до конца решить проблему некоторой эклектичности работы. Две поставленные задачи (оценка уровня электромагнитного излучения печатных плат с модальным резервированием и расчет антенн с аппроксимацией проводной сеткой) различаются и предметно и методологически. Понятно желание автора вынести на защиту все, что он сделал, но, в принципе, второй задачей можно было и пожертвовать.

2) О терминологии. Квазистационарное приближение при решении задач классической электродинамики в настоящее время очень часто называют квазистатическим, но это, по нашему мнению, не вполне корректно. Все-таки, квазистатическое приближение, строго говоря, предполагает, что всеми производными по времени можно пренебречь.

3) Сопоставление результатов моделирования и измерений в ТЕМ-камерах (рис.4.18 – 4.23) обнаруживает существенное (в 2 раза) расхождение значений резонансных частот. Автор связывает это с отклонением реального значения диэлектрической проницаемости от номинального. Это объяснение недостаточно убедительно: вряд ли имело место отклонение диэлектрической проницаемости в 4 и более раз. Данное обстоятельство следовало проанализировать более тщательно.

4) Диаграммы направленности для тестового объекта «диполь на проводящей пластине», рассчитанные в системе EMPro (рис.5.7), несимметричны относительно оси ($0 - 90^\circ$), что, с учетом симметрии задачи, вызывает вопросы. Полезно было бы отметить и объяснить этот факт.

5) О сопоставлении результатов расчетов входного импеданса симметричной биконической антенны различными методами (таблицы 5.2, 5.3). Не совсем понятно, какие значения автор считает более достоверными: полученные в EMPro, или «аналитические» (статьи Папаса и Самаддара). Оценку состоятельности и точности методики следует проводить именно по импедансным характеристикам, т.к. пространственные характеристики по сути своей – интегральные и существенно менее чувствительны к погрешностям расчета токовой функции. В данном случае отклонения в ряде случаев достаточно велики (таблица 5.3) и характер их зависимости от числа сегментов и частоты до конца не выявлен. Возможно, это связано с некорректностью за-

дачи по Адамару. Полезно было бы проанализировать устойчивость решений и (при необходимости) рассмотреть возможности регуляризации. Для рупорной антенны импедансные характеристики не приведены вообще.

6) Имеются претензии к структуре рукописи. Трехуровневая структура (раздел – подраздел – пункт), уместная в научно-техническом отчете или инженерной записке, в данном случае представляется избыточной. Обращает на себя внимание формирование выводов по отдельным подразделам и наличие очень кратких по объему и содержанию пунктов (например, 2.1.3, 2.1.4, 2.3.2, 2.3.3, 3.1.2, 4.2.1, 4.2.2 и др.). Излишняя фрагментация мешает целостному восприятию работы.

7) Форма представления материала не всегда удачна. Например, выбор структур для исследования эмиссии (п.1.2.5) изложен так, что приходится постоянно обращаться к предыдущим пунктам и рисункам подраздела. Гораздо удобнее было бы свести эскизы, особенности, аргументы и выводы в единую таблицу. Результаты измерения частотных характеристик макетов при различных значениях температуры окружающей среды (п.3.1.4, рис. 3.9 – 3.16) кажутся парадоксальными, пока не обнаруживается, что синие кривые относятся к температуре минус 50°, а не +50°, как может показаться из легенды на графиках.

Несмотря на отмеченные недостатки, общая оценка работы положительная.

9. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным положением о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Алхаджа Хасана Аднана Фаезовича «Модель и методики для оценки уровня электромагнитного излучения печатных плат с модальным резервированием и антенн с аппроксимацией проводной сеткой» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а именно – задачи развития методологии математического моделирования радиотехнических и антенных устройств в целях обеспечения эффективности, надежности, и электромагнитной совместимости, а также импортозамещения в области технологий проектирования.

Результаты исследований апробированы на российских и международных научных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы в достаточной степени отражены в опубликованных автором многочисленных научных трудах, в том числе – в рецензируемых научных изданиях, входящих в соответствующую

щий Перечень. Уровень и объем публикаций соответствует требованиям п. 11 и п. 13 Положения.

Следует отметить большое количество публикаций и наличие патентов на изобретения и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Уровень внедрения результатов диссертационной работы представляется вполне достаточным.

По результатам рассмотрения диссертации не обнаружены какие-либо факты использования заимствованных материалов без ссылки на источники, т.е. диссертация соответствует требованиям п. 14 Положения.

Автореферат диссертации, в целом, достаточно полно отражает ее содержание и соответствует требованиям п. 25 Положения.

Работа соответствует заявленным специальностям 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Алхадж Хасан Аднан Фаезович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв составлен на основании обсуждения и положительного заключения на заседании научного отдела 3 и утвержден на заседании Научно-технического совета (НТС) 24.11.2023г., протокол № 8.

Лица, подписавшие заключение, согласны с включением своих персональных данных в аттестационное дело соискателя Алхаджа Хасана А. и их дальнейшей обработкой.

Главный научный сотрудник,
д.т.н. (05.12.07), профессор

Ученый секретарь НТС, главный
научный сотрудник, д.т.н.
(05.12.07), доцент



Минкин Марк
Абрамович

Бузова Мария
Александровна

Акционерное общество «Самарское инновационное предприятие радиосистем» (АО «СИП РС»)
443052, г. Самара, ул. Земеца, д. 26Б
Тел.: +7(846) 203-14-50. Эл. почта: info@siprs.ru