

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Комнатнова Максима Евгеньевича
«Методы проектирования экранирующих конструкций,
шин электропитания и устройств для испытаний радиоэлектронных средств на
электромагнитную совместимость с учётом дестабилизирующих воздействий»,
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук
(специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения)

Общая характеристика работы. Диссертация Комнатнова М.Е. изложена на актуальную тему и посвящена решению важной научной проблемы разработки методов проектирования экранирующих конструкций радиоэлектронных средств (РЭС), помехозащищенных линий передачи и устройств для их исследования и испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС), имеющая важное народно-хозяйственное значение. Для её решения автор провёл комплекс исследований, охватывающий теоретические аспекты линий передачи и экранирования, разработку моделей, алгоритмов, методик и методов проектирования испытательных устройств, электромагнитных экранов, помехозащищенных силовых линий передачи, а также привёл экспериментальную апробацию полученных результатов. Работа выполнена на высоком научном уровне, основана на глубоком анализе теоретических основ предметной области и обширном экспериментальном материале.

Актуальность темы. В процессе эксплуатации, все устройства, содержащие РЭС, подвергаются внешним климатическим и электромагнитным воздействиям, а их работоспособность должна быть сохранена в течение длительного времени. Проектирование и создание устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов РЭС, сохраняющих работоспособность при различных электромагнитных и климатических воздействиях, с минимальным изменением параметров и характеристик компонентов, вследствие их деградиационных изменений в процессе эксплуатации является актуальной проблемой для радиоэлектронной промышленности в целом. Разработка новых методов и способов проектирования устройств ослабления излучаемых и кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП), а также устройств для их исследования и испытаний при различных видах воздействия, приближающих работу РЭС к реальным условиям эксплуатации, позволит повысить их надёжность и отказоустойчивость. Кроме того, разработка новых методов проектирования РЭС критичного назначения, например, используемой в военной, атомной, космической, медицинской и транспортной отраслях, остаётся, без сомнения, важной проблемой для обеспечения лидирующих позиций страны. Проведенные в диссертационной работе исследования по поиску новых методов проектирования РЭС, устойчивых к подобным воздействиям, остаются, без сомнения, актуальными и имеющими не только научно-техническое, но и социально-экономическое значение.

Анализ содержания диссертации. В диссертации Комнатнова М.Е. представлено комплексное исследование, посвященное разработке новых методов и способов проектирования устройств: ослабляющих излучаемые ЭМП; сильноточных линий передачи, ослабляющих амплитуды кондуктивных ЭМП; испытательных (приближающих исследования и испытания РЭС к реальным условиям эксплуатации). В диссертации последовательно раскрыта тема исследования в 6 разделах, которые хорошо структурированы и связаны между собой. Диссертация включает введение, 6 разделов, заключение, список сокращений и условных обозначений, список источников и одно приложение с копиями актов о внедрении результатов работы. Объем диссертации с приложениями составляет 534 страницы.

В 1 разделе диссертации автором представлен обзор состояния проблемы, приведены цель и постановка задач исследования для её достижения. Обозначена актуальность разработки устройств для испытаний на ЭМС РЭС при дестабилизирующих воздействиях, а также отражены методы их проектирования и применения. Описана необходимость совершенствования методов проектирования экранирующих конструкций РЭС, а также методов и средств для измерения их эффективности экранирования. Представлены существующие модели и методы для проектирования помехозащищенных линий электропередачи и необходимость их применения в современных РЭС. Детализированы методы и способы проектирования РЭС с учетом дестабилизирующих воздействий.

Во 2 разделе диссертации автор акцентирует внимание на создании устройств для исследования и испытания РЭС на ЭМС. Автором предложена методика проектирования устройств на основе линий передачи для испытания РЭС на ЭМС, на основе которой созданы, запатентованы и детально описаны устройства, в виде полосковой линии, классической, малогабаритной, гигагерцовой и коаксиальной ТЕМ-камер, а также климатической ТЕМ- и реверберационной камер для исследования и испытания РЭС на совместные климатические и электромагнитные воздействия.

В 3 разделе диссертации автор акцентирует внимание на разработке метода проектирования экранирующих конструкций. Представлены модели и методика для вычисления эффективности экранирования различных экранирующих материалов, с использованием сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер, разработанных во 2 разделе. Модели и методика программно реализованы и использованы при создании АПК, который апробирован с использованием вычислительного и натурного экспериментов, а результаты сравнены с приведенными в руководстве к выполнению зарубежного космического стандарта. Также, в данном разделе разработана и исследована группа аналитических моделей на основе эквивалентных схем для оценки эффективности экранирования конструкций. Это исследование направлено на разработку различных алгоритмов и (на их основе) программы для вычисления эффективности экранирования различных экранирующих конструкций.

Программа совместно с описанным прибором вошла в состав АПК для оценки эффективности экранирования экранирующих конструкций без внесения внутрь источников или приемников электромагнитного излучения. В завершении раздела описан разработанный метод проектирования экранирующих конструкций, включающий два разработанных АПК. Апробирован метод на примерах различных экранирующих конструкций для космической и медицинской отраслей.

В 4 разделе диссертации автором исследуется влияние формы поперечного сечения на паразитные параметры сильноточных линий электропередачи, применимых в цепях электропитания сложных радиоэлектронных систем и комплексов. Автором разработан и запатентован способ изготовления и на его основе создано и запатентовано устройство шины электропитания для перспективных космических аппаратов. Способ включает разработанные модели с разнородным диэлектрическим заполнением между двумя и более проводниками и электропроводящей тканью. Разработаны и запатентованы способ изготовления и (на его основе) устройство спиральной шины электропитания. Способ включает математические модели для вычисления погонных индуктивности и ёмкости, используя которые диссертантом исследованы влияние геометрических и электрофизических параметров спирально свернутых диэлектрических и проводящих пластин на паразитные параметры спиральной линии передачи. Изготовлены макеты спиральной линии передачи и проведен ряд экспериментальных исследований. Модели применены при вычислении электрических параметров каждого витка спирально свернутых обкладок конденсатора и показана применимость разработанного алгоритма при создании схемотехнической модели конденсатора. Создан АПК для синтеза и испытаний на ЭМС элементов цепей электропитания и с его помощью исследовано воздействие электростатического разряда (ЭСР) на шину электропитания.

В 5 разделе диссертации автором проведён ряд исследований излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости элементов и узлов РЭС. Представлены методики оценки уровней излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллеров в ТЕМ-камере, а также модель для оценки уровня наведённого тока на микрополосковую линию в ТЕМ-камере при подаче на её вход сигнала. Предложен метод локализации и исправления ошибок данных в микроконтроллере после дестабилизирующего воздействия и приведены экспериментальные исследования излучаемых помехоэмиссии и восприимчивости микроконтроллеров в ТЕМ-камере.

В 6 разделе диссертации автором оценено дестабилизирующее воздействие на элементы РЭС. Представлено влияние температуры на экранирующие свойства электромагнитных барьеров. Описаны модель и методика учета воздействия температуры и влажности окружающей среды на характеристики микрополосковой линии. Представлены методики и измерены уровни излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллеров в ТЕМ-

камере при температурном воздействии. Оценено влияние температуры на электрические характеристики пассивных и активных компонентов РЭС. Оценено влияние емкости посадочного места биполярного и полевых транзисторов при воздействии на него помехи от генератора ЭСР.

В заключении сформулированы основные выводы работы, рекомендации и дальнейшие развития темы исследования.

Научная новизна. К наиболее важным научным результатам, полученным в диссертации и имеющим теоретическую и практическую значимость, стоит отнести:

1. Комплекс устройств на основе линий передачи для имитации и оценки ЭМП РЭС в диапазонах частот до 12 ГГц и температур от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$.

2. Модели и методики для анализа экранирования и ослабления ЭМП в диапазоне частот от 100 кГц до 20 ГГц с использованием различных материалов и конструкций и на их основе метода проектирования экранирующих конструкций РЭС.

3. Методы проектирования сильноточных линий передачи со спиральным или прямоугольным поперечными сечениями с ослабленными паразитными параметрами и электромагнитным излучением.

4. Методики оценки излучаемых электромагнитных эмиссии и восприимчивости микроконтроллера, учитывающие его положение относительно центрального проводника в ТЕМ-камере, а также наведенные токи на микрополосковую линию и микроконтроллер при воздействии сверхкороткого импульса на вход ТЕМ-камеры.

5. Метод ослабления излучаемой ЭМП микроконтроллера и восприимчивости к ней, за счет использования разнородного электромагнитного экрана и программного обеспечения в микроконтроллере.

Таким образом, оригинальные результаты соответствуют п. 7 и 16 паспорта научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, в части разработки и исследования методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному излучению (п. 7), а также разработки технических основ проектирования, конструирования и испытания радиотехнических устройств (п. 16).

Теоретическая значимость диссертации подтверждается расширением средств обеспечения надёжности и отказоустойчивости РЭС при совместных электромагнитных и климатических воздействиях, комплексом математических моделей для количественной оценки экранирования материалов и конструкций, математическими моделями линий передачи для вычисления погонных параметров линий передачи со спиральным поперечным сечением, аналитическими моделями для вычисления наведенных токов и напряжений на линию передачи в ТЕМ-камере, предложенным подходом с применением аппаратных и программных средств помехозащиты микроконтроллеров с

разработанной методикой для оценки уровней помехоустойчивости интегральных схем к непрерывному и импульсному воздействиям и метода для выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера после дестабилизирующих воздействий, широтой анализа излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости РЭС при климатическом воздействии на него и количественной оценке ослабления помехи от РЭС, моделями и методиками исследования дестабилизирующих воздействий на компоненты и узлы РЭС для оценки влияния температуры и влаги на источники и приемники электромагнитного излучения.

Практическая значимость диссертации подтверждается актами внедрения результатов в производственные, научные и образовательные организации (АО «РЕШЕТНЁВ», ИСЭ СО РАН, НИ ТГУ), а также использованием в учебном процессе и научной деятельности университета.

К практически значимым результатам относятся:

1. Методика проектирования устройств на основе линии передачи и ряд созданных с помощью неё устройств для измерения эффективности экранирования различных материалов и испытания компонентов РЭС на ЭМС.

2. Модели, метод и программа для количественной оценки экранирующих свойств различных корпусов РЭС, их взаимного расположения в комплексной системе экранов, а также при дестабилизирующем воздействии на них.

3. Методы проектирования и способы изготовления помехозащищённых линий электропередачи с прямоугольным и спиральным поперечными сечениями.

4. Методики оценки уровней излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости ИС при температурном воздействии.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации Комнатнова М.Е. подтверждена использованием теоретических основ экранирования и теории линий передачи, согласованностью результатов полученных моделей с несколькими известными численными методами и натурным экспериментом, использующим современное оборудование, совпадением полученных результатов с результатами теоретических оценок, нормативных документов и вычислительного эксперимента, достижимостью результатов, описанных в патентах, с полученными на практике и использованием нескольких программных продуктов.

Полнота опубликования результатов работы, соответствие автореферата содержанию диссертации. Результаты диссертации Комнатнова М.Е. отражены в 182 публикациях, включая 29 журнальных и 2 в материалах докладов из перечня ВАК, 5 индексируемых Scopus/WoS (в т.ч. из Q1), 40 докладов на международных конференциях индексируемых Scopus/WoS, 1 монографию, 2 статьи в рецензируемом журнале; 63 доклада в трудах других

конференций, 11 патентов на изобретение и 29 свидетельств о регистрации программ. **Автореферат** диссертации отражает основное содержание работы, ее цель, задачи, методы исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, а также основные выводы и рекомендации.

Замечания по диссертации и автореферату:

1. В основном, для созданных устройств анализируются S -параметры, по которым делается вывод о применимости устройств в заданном диапазоне частот, однако автор не приводит результаты оценки поперечной составляющей напряженности электрического поля, которая имеет очень важное значение при измерении электромагнитной эмиссии в ТЕМ-камере и должно сохраняться в небольших (3 дБ) пределах, в зоне испытываемого объекта в соответствии с действующими стандартами;

2. Верификацию моделей и валидацию методов измерения, в основном, проводят с использованием известных традиционных и устоявшихся методов измерения, о которых автор упоминает в обзоре, но при этом в некоторых важных моментах опускает подобное сравнение. Например, на рис. 3.34 автор приводит сравнение измеренных в коаксиальной камере и вычисленных разными методами результаты эффективности экранирования радиопоглощающего материала, но не приводит сравнения с традиционным способом измерения, основанным на антенных измерениях в безэховой камере.

3. В начале раздела 4 автор заявляет, что «представлены результаты разработки методов проектирования и способов изготовления помехозащищённых сильноточных ЛП, а именно СШЭП, для больших токов постоянного или переменного напряжения, от одного или нескольких источников к одному или нескольким потребителям электроэнергии» при этом для переменного напряжения шина слабо исследована и нет результатов вычисления и испытания по падению напряжения и прочему при переменном напряжении.

4. В разделах 5 и 6 детально приведены результаты измерения уровней излучаемой помехоэмиссии, но не указано каким уровням она должна соответствовать. При этом на рисунке 3.12б автореферата (стр. 18) приводятся некоторые пунктирные линии с подписями «Н7М», «К9С», «М11», вероятно ограничительные кривые, но в тексте про них ничего не сказано и непонятна их природа и откуда они.

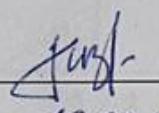
5. В разделе 3 диссертации детально описан метод проектирования экранирующих конструкций радиоэлектронных средств с учетом дестабилизирующих воздействий. Приведена и пояснена блок-схема метода, описаны методики проектирования одиночного и многоуровневого корпусов, приведены различные рекомендации и приведены результаты применения метода. Однако целесообразно было более детально привести пример поэтапного применения метода в соответствии с блок-схемой, а также сравнительный анализ предложенного метода с существующими.

Закключение. Из вышеизложенного следует, что диссертация Комнатнова Максима Евгеньевича является научно-квалификационной работой, в которой изложена совокупность имеющих важное народно-хозяйственное значение результатов, в виде методик и методов, направленных на получение новых знаний, применимых на различных стадиях проектирования экранирующих конструкций, шин электропитания и устройств для испытания РЭС на ЭМС.

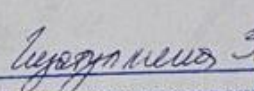
Считаю, что диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор, Комнатнов М.Е., заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ

 Гизатуллин Зиннур Марселевич
10.03.2025

ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.
Телефоны: +7 (843) 231-00-81
E-mail: zmgizatullin@kai.ru

Подпись  5
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

