

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке, инновациям
и цифровизации ФГБОУ ВО «ВГУ»,



И.Ф. М.Н.

Костин Д.В.

«03» 03 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации «Воронежский государственный университет» на диссертацию Комнатнова Максима Евгеньевича «Методы проектирования экранирующих конструкций, шин электропитания и устройств для испытаний радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость с учётом дестабилизирующих воздействий» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Актуальность тематики диссертационной работы

Множество индивидуальных задач в области электромагнитной совместимости (ЭМС) решается при проектировании современных радиоэлектронных средств (РЭС). Повышение их надежности и отказоустойчивости при работе в климатически сложных условиях, обостряет проблему ЭМС, поскольку одновременно на РЭС воздействуют внутренние и внешние температурные и электромагнитные поля, что непредсказуемо влияет на работу РЭС. Поиск новых методов проектирования, учитывающих подобные воздействия, становится в настоящее время всё более важным и актуальным, особенно при освоении Арктики и регионов крайнего Севера. В подобных условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, исследовать характеристики РЭС сложно, а в некоторых случаях невозможно. Сымитировать подобные температурные и электромагнитные воздействия на РЭС можно, используя специализированные устройства, разработка которых является актуальным направлением исследования диссертационной работы, а полученные с их помощью результаты будут востребованы на различных предприятиях радиоэлектронной промышленности. Кроме того, при обеспечении ЭМС проектируемого РЭС особое внимание уделяется экранирующим конструкциям, ослабляющим излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП), а также линиям передачи, обеспечивающим целостность сигналов и питания РЭС. Поэтому, тема данной диссертации, посвященная поиску новых методов и способов их проектирования, является важной актуальной задачей.

Соответствие темы диссертационной работы научной специальности

Диссертационная работа Комнатнова М.Е. является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему. Соискателем предпринята попытка решения проблемы разработки методов проектирования экранирующих конструкций, шин электропитания и устройств для испытаний РЭС на ЭМС с учётом дестабилизирующих воздействий. Изначально автором разработана оригинальная методика, которая апробирована при создании 5 видов различных устройств на основе линий передачи, для исследования и испытания РЭС в области ЭМС, с возможностью проведения исследований при дестабилизирующих воздействиях. Разработан ряд математических моделей для оценки экранирующих свойств материалов и корпусов, использование которых совместно с созданными устройствами позволило автору создать два аппаратно-программных комплекса (АПК). Используя АПК, продемонстрированы их преимущества и приведены результаты исследования различных композитных материалов, а также экранирующих конструкций. Описан предложенный автором метод проектирования экранирующих конструкций, включающий применение двух АПК, разработанных методик и рекомендаций. Представлены результаты разработки методов проектирования и способов изготовления помехозащищённых сильноточных линий передачи с прямоугольным и спиральным поперечными сечениями. Разработаны методики измерения уровней излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем и определено влияние на них различных факторов и режимов работы. Описана модель для оценки уровня наведённого тока на объект внутри ТЕМ-камеры при воздействии на её вход испытательного сигнала. Разработан метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера после воздействия электромагнитных помех посредством разделения и анализа состояния её блоков. Проведен ряд исследований излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллеров и сравнены результаты измерения в ТЕМ-камере и БЭК. Предложен способ повышения помехозащищённости элементов и устройств РЭС на печатной плате экранирующей тканью и композитным материалом. Представлены модель и методика учета воздействия температуры и влажности окружающей среды на характеристики микрополосковой линии, позволяющие оценить электрические характеристики линии в широких диапазонах частот, температур и влажности воздуха. Разработаны методики и измерены уровни излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем в ТЕМ-камере при температурном воздействии. Оценено влияние емкости посадочного места биполярного и полевых транзисторов при воздействии на

него помехи, созданной электростатическим разрядом (ЭСР).

В результате проведены комплексные исследования, показывающие, что тема, содержание и полученные в диссертации результаты соответствуют п. 7 (в части разработки и исследования методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических устройств, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному излучению и методов защиты информации в этих системах), а также п. 16 (в части разработки технических основ проектирования, конструирования, испытания и сертификации радиотехнических устройств) **паспорта научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.**

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и одного приложения с актами внедрения результатов диссертационной работы. Работа изложена на 534 страницах, содержит 383 рисунка и 22 таблицы, а также список литературы из 789 наименований. Оформление и основное содержание работы соответствуют рекомендациям ВАК и ГОСТ.

Во введении дана общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследования для решения обозначенной в работе проблемы.

В первом разделе обоснованы актуальность проектирования и необходимость применения устройств для испытания РЭС на ЭМС при совместных температурных и электромагнитных воздействиях. Описаны существующие методы оценки эффективности экранирования материалов и корпусов и необходимость их совершенствования. Представлены методы и способы проектирования шин электропитания, а также РЭС в целом с учетом подобных воздействий. На их основе сформулированы цель и задачи работы.

Во втором разделе представлена разработанная автором методика, которая детализирована на примере разработки ТЕМ-камеры и апробирована при создании 5 видов запатентованных устройств на основе линии передачи для испытаний РЭС на ЭМС, в т.ч. при температурном воздействии на РЭС. Приведены результаты измерения характеристик и оценены погрешности. Описаны элементы и устройства поддержания температуры внутри ТЕМ- и электромагнитной реверберационной камер.

В третьем разделе автором описано создание двух АПК для оценки эффективности экранирования экранирующих материалов и металлических корпусов. Первый АПК включает разработанные автором оригинальные математические модели для оценки эффективности экранирования материалов в сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камерах из раздела 2. Второй

АПК включает разработанные модели, алгоритмы, метод и устройство для оценки эффективности экранирования экранирующих корпусов. Для обоих АПК представлены верификация, валидация и применение на примерах реальных экранирующих материалов и конструкций РЭС, в т.ч. для космических аппаратов. Представлены результаты разработки метода проектирования экранирующих конструкций с применением разработанных АПК, методик и рекомендаций.

В четвертом разделе автором представлены результаты разработки методов проектирования и способов изготовления линий передачи, используемых в силовых цепях электропитания РЭС постоянного напряжения. Автором запатентован способ изготовления многофазной помехозащищенной силовой шины электропитания, на основе которого разработано, создано и запатентовано устройство помехозащищенной силовой шины электропитания. Описан проведенный на предприятии комплекс мероприятий по электрическим испытаниям изготовленного макета устройства, а само устройство внедрено в АО «РЕШЕТНЕВ». Также описан метод проектирования и запатентован способ изготовления линии передачи со спиральным поперечным сечением, в виде вложенных друг в друга и свернутых вместе пластин. Представлены оригинальные математические модели для описания данной линии передачи и результаты оценок погонных параметров с использованием вычислительного и натурального экспериментов. Разработан и запатентован АПК для испытаний подобных шин электропитания, включающий созданные во втором разделе устройства. Оценена помехозащищенность шин электропитания с разными формами поперечных сечений, в т.ч. к воздействию электростатического разряда.

В пятом разделе предложены методики и выполнены с их помощью оценки уровней излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллеров. Предложена модель для оценки уровня наведённого тока на объект внутри ТЕМ-камеры при воздействии на её вход заданного сигнала от генератора. Представлен метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера при разных видах обращения к нему и управления им. Продемонстрировано сравнение результатов, полученных с использованием ТЕМ-камеры из второго раздела и полу-БЭК с разработанной программой для автоматизированных испытаний на ЭМС. Предложен способ экранирования микроконтроллеров на плате с использованием экранирующей ткани и композитного материала. Продемонстрировано преимущество и применение данного способа на примерах с разными экранирующими тканями.

В шестом разделе сведены результаты, связанные с оценкой влияния температуры на эффективность экранирования металлических пластин и

корпусов, а также композитных и органических материалов, с использованием коаксиальной камеры из второго раздела. Описаны модель и методика учета влияния температуры и влажности на характеристики микрополосковой линии. Разработаны методики и продемонстрированы их применения при измерениях уровней излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости трех микроконтроллеров в ТЕМ-камере из второго раздела при температурном воздействии. Оценено влияние температуры на электрические характеристики пассивных и активных компонентов РЭС, а также влияние емкости посадочного места биполярного и полевых транзисторов при воздействии на них помехи от генератора ЭСР.

В заключении представлена совокупность полученных результатов в работе, сформулированы её основные научные и практические результаты, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна и ценность полученных соискателем результатов, выводов и рекомендаций

Научная новизна диссертации определяется следующими результатами.

1. Созданы устройства для испытаний РЭС на ЭМС, отличающиеся возможностью имитации и оценки ЭМП в широких диапазонах частот и температур.

2. Предложен метод оптимального проектирования многоуровневых экранирующих конструкций РЭС, отличающийся использованием оригинальных аналитических моделей и методик измерения эффективности экранирования композитных, радиочастотных, тканых и органических материалов, а также частотно-селективных структур.

3. Предложены методы проектирования помехозащищённых линий передачи повышенной электрической мощности, отличающиеся использованием линии передачи спирального или прямоугольного поперечного сечения из двух и более электропроводящих слоёв с разнородным диэлектрическим заполнением и электромагнитными связями между слоями, уменьшающими паразитные параметры, и внешнего электромагнитного экрана из металлизированной ткани.

4. Предложены методики оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем, отличающиеся учетом угла поворота интегральной схемы относительно центрального проводника в ТЕМ-камере на заданное значение, аналитической оценкой наведенных токов на микрополосковую линию и натурной оценкой помехоустойчивости интегральных схем к импульсному электромагнитному излучению, создаваемому внутри ТЕМ-камеры при воздействии на её вход сигнала от генератора сверхкороткого импульса или имитатора ЭСР.

5. Предложен метод ослабления уровня излучаемой ЭМП микроконтроллера и восприимчивости к ней, отличающийся использованием слоистого электромагнитного экрана из тканного, композитного и металлического материалов и программных средств в микроконтроллере для обнаружения и восстановления работоспособности после сбоя.

Научная ценность диссертации также подтверждается весьма широкой опубликованностью её результатов, как в отечественной, так и зарубежной печати (опубликовано 182 работы, в т.ч. 34 статьи в журналах, входящих в перечни ВАК и Scopus/WoS, а также 11 патентов на изобретение).

Значимость результатов работы для теории и практики

Теоретическую ценность результатов работы определяет разработанный инструментарий для оценки и обеспечения ЭМС РЭС, имеющий важное хозяйственное значение. Так, к теоретическим основам конструирования РЭС с учётом ЭМС можно отнести разработанный комплекс математических моделей электромагнитных экранов, позволяющий проводить количественную оценку экранирующих свойств конструкций из различных материалов. Также теоретическую ценность определяют модели линий передачи для вычисления погонных параметров линии, образованной из спирально свернутых диэлектриков и проводящих пластин, что может быть применимо для исследования не только помехозащищенных шин электропитания, но и для сигнальных цепей с частотно-селективными свойствами. Кроме того описана аналитическая модель для вычисления наведенных токов на микрополосковую линию, размещенную внутри ТЕМ-камеры, что определяет её возможное дальнейшее использование для оценки устойчивости различных объектов, размещенных внутри камеры. Продемонстрирован метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера после дестабилизирующего воздействия и представлена методика оценки устойчивости интегральных схем к непрерывному и импульсному воздействиям ЭМП, что расширяет теоретические подходы к анализу излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем и может быть в дальнейшем использовано для модернизации существующих стандартов в области ЭМС.

Практическая ценность заключается в совокупности результатов работы, применимых на разных этапах проектирования экранирующих конструкций, шин электропитания и устройств для испытания РЭС на ЭМС. Устройства могут быть применимы для измерения экранирующих свойств различных композитных материалов, что продемонстрировано на примере разных материалов, создаваемых в НИ ТГУ, ООО «ТехЭкра» и «РТ-технологии», а также при исследовании воздействия электрического поля

высокой напряженности на малый объект, как это было применено в ИСЭ СО РАН. Модели и метод экранирования РЭС могут быть применены на этапах эскизного и технического проектирования, что позволит качественно и количественно оценить экранирующие свойства корпусов РЭС, с учётом их заполнения различными материалами и другими экранами. Модели и метод экранирования применены при анализе экранирующих конструкций из АО «РЕШЕТНЁВ» и НИ ТГУ. Метод проектирования и способ изготовления помехозащищённых линий электропередачи с прямоугольным поперечным сечением позволил спроектировать, изготовить, испытать и внедрить в АО «РЕШЕТНЁВ» помехозащищенную силовую шину электропитания космического аппарата, имеющую оптимальную форму поперечного сечения. Кроме того, предложены метод проектирования и способ изготовления шины электропитания со спиральным поперечным сечением, которая обладает более низкими паразитными параметрами, по сравнению с прямоугольным поперечным сечением, что является её преимуществом и может стать отправной точкой дальнейших исследований. Разработан и внедрен в АО «РЕШЕТНЁВ» АПК, включающий созданные устройства на основе линий передачи для исследования элементов сети электропитания космического аппарата. Усовершенствованы алгоритмы и методики для испытания интегральных схем на излучаемые помехоэмиссию и помехоустойчивость в ТЕМ-камере. Разработан метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера после дестабилизирующего воздействия на него. Предложена методика для оценки электрических параметров микрополосковой линии при воздействии на неё температуры и влажности воздуха. Разработаны методики и оценены уровни излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллеров при температурном воздействии. Результаты работы использованы в 27 НИР (по грантам РФФИ, РФФИ, госзадания) и ОКР, а также в учебном процессе двух университетов.

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность и достоверность результатов, изложенных в работе, подтверждена качественным и количественным совпадением полученных результатов с результатами теоретических оценок, нормативных документов и вычислительного эксперимента, а также валидацией и верификацией результатов, полученных математическими моделями, известными численными методами и натурным экспериментом с использованием современных сертифицированных аппаратно-программных комплексов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертационной работе

В работе представлен ряд разработанных устройств, детально описаны практические и теоретические результаты, которые могут быть довольно широко применены на различных предприятиях, в центрах стандартизации и сертификации, в вузах при исследованиях и испытаниях РЭС на ЭМС.

Замечания по работе

1. В п. 2.2 приведены результаты разработки климатической электромагнитной реверберационной камеры и макет резонатора. Однако, отсутствуют примеры ее использования.

2. В диссертации отсутствуют результаты оценки эффективности экранирования или вносимых потерь металлических материалов с использованием разработанного АПК. Наличие таких оценок позволило бы сравнить полученные результаты с методиками стандарта европейского космического агентства.

3. Из текста диссертации не ясно, что понимается под элементами сети высоковольтного электропитания РЭС, для которых в п. 4.4, разработан АПК. Кроме того, в п. 4.4 приведены разработанные методики, алгоритмы, программные модули, схемы, прототип и пр., но в этом и следующем подразделах (п. 4.5 «Анализ помехозащищенности...») отсутствует информация об использовании АПК и его режимах работы. Это было бы целесообразно привести для верификации и валидации АПК.

4. Соискателем проведены обширные исследования электромагнитной эмиссии и устойчивости микроконтроллеров. При этом утверждается, что разработаны методики и алгоритмы измерения в общем для интегральных схем. Целесообразно было расширить апробацию методик на других примерах интегральных схем, например, с использованием операционных усилителей или логических элементов.

Выводы

1. Представленная соискателем диссертационная работа имеет актуальную тему, сформулированные тезисы научной новизны и значимости для науки и практики, раскрывающие поставленную цель и сформулированные для неё задачи, направленные на решение актуальной проблемы в области радиотехники, имеющей достаточно важное хозяйственное значение.

2. Результаты работы апробированы на различного уровня конференциях, а также в достаточной степени изложены в журнальных публикациях отечественных и зарубежных издательств.

3. Автореферат в достаточной мере отражает основное содержание

диссертации, а его оформление соответствует требованиям ВАК РФ.

Заключение

Считаем, что представленная работа удовлетворяет п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ...», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 25.01.2017), а её автор, Комнатнов Максим Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании кафедры электроники (протокол №2 от 28 февраля 2025г.)

Доктор физико-математических наук, профессор-консультант кафедры электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»

Бобрешов Анатолий Михайлович

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

394006, Россия, г. Воронеж,

ФБГУ ВО «Воронежский государственный университет»

Университетская пл., 1, к. 234.

Телефоны: +7 (473) 220-82-84 (раб.); 8-910-749-79-45 (сот.)



федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)

подпись *Бобрешова А.М.*
должность *вз. специалист*
подпись, расшифровка подписи *С. Сивкина 03.03.2025*