

ОТЗЫВ официального оппонента

доктора технических наук Ромащенко Михаила Александровича
на диссертационную работу 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 по
специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы разработки новых методов и способов проектирования электромагнитных экранов и линий передачи для ослабления амплитуд излучаемых и кондуктивных помех в радиоэлектронных устройствах (РЭУ) в целях соблюдения норм и требований обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС), а также новых устройств для испытаний на ЭМС РЭУ в условиях близких к эксплуатационным. Решенная в диссертационной работе проблема, представленная в виде совокупности задач в области ЭМС, имеет важное хозяйственное значение.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Вопросы обеспечения ЭМС различных радиоэлектронных модулей и компонентов составляют важную часть проблематики в радиотехнике. Проблема ЭМС в РЭУ обостряется ужесточением требований предъявляемых к РЭУ, а также нормами ЭМС, устанавливаемыми в различных стандартах. Растущие требования к эффективности и компактности РЭУ, а также их надежности и отказоустойчивости в условиях внешних воздействий, приобретает всё большее значение в современном мире. При работе РЭУ подвергаются воздействию различных факторов, при этом их характеристики должны быть стабильны в течение длительного времени. Диссертационная работа М. Е. Комнатнова посвящена исследованию и разработке методов и методик проектирования электромагнитных экранов, цепей электропитания устройств для испытания на ЭМС РЭУ в условиях дестабилизирующих воздействий, что делает её несомненно актуальной.

Несмотря на большое число работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных задачам экранирования и разработке устройств для испытания на ЭМС, вопросы, связанные с испытанием РЭУ при заданных температурных и электромагнитных воздействиях, остаются открытыми. Также слабо исследованы устройства позволяющие проводить одновременные климатические испытания и тестирование на требования ЭМС.

Целью диссертационной работы является разработка методов

проектирования экранирующих конструкций, шин электропитания и устройств для испытаний РЭС на ЭМС с учётом дестабилизирующих воздействий.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа М представлена на 534 страницах, включает список литературы из 789 наименований на 45 страницах и приложения с актами внедрения на 14 страницах.

Автореферат объемом 36 страниц адекватно отражает содержание диссертации и соответствует нормативным документам и рекомендациям ВАК.

Работа состоит из введения, шести разделов, заключения с рекомендациями и перспективой дальнейшей разработки темы, а также списка сокращений и условных обозначений. В работе отражены результаты исследования связанные с разработкой новых методик и методов проектирования электромагнитных экранов, линий передачи для цепей электропитания и устройств для испытания на ЭМС.

Введение содержит актуальность выбранной темы исследования, а также описывает степень её разработанности. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна полученных результатов, а также их значимость для теории и практики. Описана использованная методология исследования. Приведены положения выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов полученных в диссертационной работе. Представлены сведения об апробации результатов работы и их использовании при выполнении НИР и ОКР. Охарактеризованы основные публикации, а также личный вклад автора внесенный в данное исследование. Изложено краткое содержание диссертации, описаны её структура и объём.

Раздел 1 содержит обзор состояния проблемы, а также сформулированные цель и задачи исследования. Выделена актуальность разработки и применения устройств для испытаний на ЭМС различных РЭУ при дестабилизирующих воздействиях. Приведены существующие методы проектирования и применения устройств на основе линий передачи, а также методы испытания на совместные климатические и электромагнитные воздействия. Детализированы существующие подходы к проектированию экранирующих конструкций и выделены методы измерения эффективности экранирования материалов и конструкций. Описаны существующие методы и способы проектирования РЭУ с учетом дестабилизирующих воздействий.

Раздел 2 содержит результаты разработки и создания устройств для испытаний на ЭМС с возможностью их проведения при дестабилизирующих воздействиях. Описана методика проектирования и результаты её применения в виде устройств на основе линий передачи для испытаний на ЭМС. Детально представлены созданные ТЕМ-камеры, коаксиальная камера, полосковая линия. Приведены результаты разработки климатической экранированной камеры для испытаний РЭУ на совместные климатические и электромагнитные воздействия.

Раздел 3 посвящен результатам разработки средств и методик проектирования экранирующих конструкций РЭУ с учетом

дестабилизирующих воздействий. Описан аппаратно-программный комплекс для оценки эффективности экранирования материалов, использующий ТЕМ- и коаксиальную камеры, а также оригинальные математические модели. Представлен аппаратно-программный комплекс использующий группу оригинальных моделей, алгоритмов, методик и на их основе программы для оценки эффективности экранирования конструкций без внесения датчиков поля внутрь. Приведены результаты верификации, валидации и применения разработанных аппаратно-программных комплексов для оценки эффективности экранирования материалов и корпусов. Детализирован метод проектирования для оптимального размещения внутренних корпусов во внешнем при дестабилизирующем воздействии.

Раздел 4 содержит результаты разработки методов проектирования и способов изготовления помехозащищённых линий передачи в виде шин электропитания, предназначенных для использования в цепях электропитания постоянного тока и напряжения. Представлен анализ влияния формы поперечного сечения шины электропитания и выбор его оптимального значения для создания помехозащищенной шины. Обоснована разработка методики проектирования и способ изготовления шины электропитания с прямоугольным поперечным сечением кабельной сети космического аппарата. Описан метод проектирования и способ изготовления шины электропитания со спиральным поперечным сечением. Представлен аппаратно-программный комплекс для синтеза и испытания таких шин. С его помощью оценена помехозащищенность к воздействию электростатического разряда (ЭСР) шин с разными формами поперечных сечений.

Раздел 5 содержит модель для оценки уровня наведённого тока на микрополосковую линию внутри ТЕМ-камеры и по ней сделаны оценки воздействия ЭСР и различных форм сигналов на вход ТЕМ-камеры. Описаны методики измерения уровня излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем. С их помощью определено влияние типа источника питания и режимов работы микроконтроллера на излучаемую помехоэмиссию. Разработан метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера после воздействия электромагнитного поля в ТЕМ-камере, а также проведен ряд экспериментальных исследований излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллера. Оценена эффективность предложенного способа электромагнитного экранирования элементов и узлов РЭУ на печатной плате экранирующей тканью и композитным материалом.

Раздел 6 посвящен результатам оценки влияния температуры на экранирующие свойства электромагнитных барьеров, разработки модели и методики учета воздействия температуры и влажности окружающей среды на характеристики микрополосковой линии, а также приведены методики измерения уровней излучаемых помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллеров в ТЕМ-камере при температурном воздействии.

В заключении обобщены результаты диссертационного исследования и выполнено их сопоставление с паспортом научной специальности.

Сформулированы рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены копии документов, подтверждающих использование результатов работы

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Новизна диссертационной работы заключается в разработке методики проектирования устройств на основе линий передачи для испытания элементов и узлов РЭУ на ЭМС, а также в методе оптимального проектирования многоуровневых экранирующих конструкций использующего ряд разработанных аналитических моделей и методик измерения эффективности экранирования различных материалов и структур. Новыми являются предложенные автором методы проектирования и способы изготовления линий передачи с прямоугольным и спиральным поперечными сечениями проводников для цепей электропитания РЭУ. Также к новым результатам можно отнести предложенные методики оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем и метод уменьшения уровней излучаемой помехоэмиссии и восприимчивости микроконтроллера за счет слоистого электромагнитного экрана и программных средств для обнаружения и восстановления работоспособности микроконтроллера после сбоя. Новизна технических решений подтверждена патентами, новизна программных решений – свидетельствами о госрегистрации программ для ЭВМ.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Значимость диссертационной работы для теории заключается в развитии инструментария анализа и обеспечения ЭМС РЭУ подверженных совместным электромагнитным и климатическим воздействиям. Инструментарий содержит устройства для совместных климатических и электромагнитных воздействий, модель для вычисления наведенных токов и напряжений на линию передачи в ТЕМ-камере, методику для оценки уровней эмиссии и устойчивости интегральных схем, метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера, модели и методики для комплексных систем электромагнитных экранов. Кроме того к значимым результатам для теории можно отнести ряд аналитических моделей для оценки эффективности экранирования электромагнитных экранов и комплекс математических моделей для вычисления погонных индуктивности и ёмкости линий передачи со спиральным поперечным сечением.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Значимость диссертационной работы для практики определяют предложенные модели, методики и устройства. Так, модели и программа для вычисления и анализа эффективности экранирования, метод проектирования и способ изготовления шины электропитания, а также её макет и прототип аппаратно-программного комплекса для испытания шин на ЭМС, использованы в АО «РЕШЕТНЁВ». Разработанная методика проектирования и по ней созданное устройство ТЕМ-камеры использовано в ИСЭ СО РАН. Кроме того,

созданные коаксиальная и ТЕМ-камеры использованы при измерении эффективности экранирования различных экранирующих материалов производства ООО «ТехЭкра», «РТ-технологии» и НИ ТГУ. Разработанные модели, метод экранирования и аппаратно-программный комплекс применены при оценке экранирования различных конструкций разрабатываемых в АО «РЕШЕТНЁВ», а также в устройстве для лечения глубокого обморожения конечностей человека разрабатываемого в НИ ТГУ. Модели для оценки эффективности экранирования различных экранирующих пластин и корпусов применены в НИИ ПММ ТГУ.

СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Достоверность результатов подтверждается согласованностью результатов полученных математических моделей, известных численных методов (конечных элементов (МКЭ), моментов, матриц линий передачи (ММЛП), конечных разностей во временной области) и натурального эксперимента с поверенным оборудованием;

Обоснованность научных положений и выводов определяется качественным и количественным совпадением полученных результатов с результатами теоретических оценок, нормативных документов и вычислительного эксперимента;

Выводы и рекомендации обусловлены достижимостью технического результата в полученных патентах; использованием результатов на практике; использованием нескольких программных продуктов.

ПОЛНОТА ОПУБЛИКОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ, СООТВЕТСТВИЕ АВТОРЕФЕРАТА СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертационного исследования прошли достаточную апробацию участием на конференциях и победой в конкурсах различного уровня, включая руководство большим молодежным проектом РФ и его продолжением. Результаты исследований опубликованы в 182 работах, из которых 29 – в изданиях из перечня ВАК, 5 – в журналах индексируемых наукометрической базой WoS/Scopus, 1 – монография, 11 – патентов на изобретение, 29 – свидетельств о регистрации программ, а также труды в докладах отечественных и зарубежных конференций, в т.ч. 40 индексируемых наукометрическими базами WoS/Scopus.

Автореферат представлен в научном стиле, с четким и логичным изложением основных положений, результатов и выводов диссертации. Автореферат содержит полную и точную информацию о содержании работы, предоставляя все необходимые данные для оценки научной значимости и достоверности исследования.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ И АВТОРЕФЕРАТУ

К диссертационной работе и автореферату имеются следующие

замечания:

1. Пункт 1 заявленной научной новизны, в представленной формулировке, относится скорее к практической значимости исследования. Было бы правильнее переформулировать этот пункт, указав в нем совокупность разработанных методов, методик, алгоритмов и моделей как некий методологический аппарат, позволяющий проектировать и изготавливать устройства для испытаний РЭС на ЭМС в широких диапазонах частот и температур.

2. В работе рассматривается множество задачи оптимизации, включая многокритериальные, однако не все они представлены в формализованном математическом виде (стр.122, стр.137). Не всегда в явном виде обозначены целевая функция, граничные условия, весовые коэффициенты, дискретность или непрерывность параметров оптимизации. Отсутствие математической постановки оптимизационной задачи затрудняет объективную оценку эффективности предложенных решений и их применение в практических задачах.

3. Представленная блок-схема метода проектирования многоуровневых экранирующих конструкций (рис. 3.84) является запутанной и не дает четкого понимания правильной последовательности действий. Например, из блока «Анализ требований по ЭМИ радиопомех и восприимчивости» возможен выход на три разных последующих этапа «Анализ уровней в соответствии с НД», «Определение степени жесткости испытаний» и «Измерения уровней излучаемой помехоэмиссии и помехоустойчивости РЭА». Не ясно чем руководствоваться разработчику при выборе следующего этапа действия.

4. В разделе 4 используется термин «надежность» (стр. 307, 310) однако не дано формальное определение этого понятия в контексте проектирования силовых шин электропитания, не приведены единицы измерения. По тексту диссертации можно предположить, что автор подразумевает механическую жесткость шины. Так фигурируют выражения «прогиб конструкции» (стр. 310), «продольный изгиб» (стр. 313), «гибкость» (стр. 316). В таком случае лучше использовать характеристику «деформация» и математически описать её влияние на надежность, которая является комплексной характеристикой множества критериев.

5. Предложенный метод программной помехозащиты микроконтроллера в случае отсутствия аппаратного блока подсчёта контрольной суммы использует программный способ (источник 759 стр. 75). В диссертации не указано, насколько в этом случае возрастут дополнительные вычислительные затраты, ложащиеся на микроконтроллер.

6. В методике оценки влияния пленки воды на S-параметры линии передачи (стр. 435) предполагается равномерное распределение слоя воды. Однако в реальных конструкциях печатных плат линия передачи и диэлектрическое основание являются несмачивающимися поверхностями, которые будут покрываться каплями конденсированной влаги. Также не учитывается наличие влагозащитного лака на поверхности печатной платы.

