

На правах рукописи



Комнатнов Максим Евгеньевич

**Анализ эффективности экранирования
бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата
и создание устройств для испытаний
на электромагнитную совместимость**

Специальность 05.12.07 – Антенны,
СВЧ устройства и их технологии

Специальность 05.12.04 – Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск– 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Газизов Тальгат Рашитович**,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник

Официальные оппоненты: **Дунаевский Григорий Ефимович**, доктор
технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет», г. Томск

Гизатуллин Зиннур Марселевич, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-
КАИ», г. Казань

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится 27 сентября 2016 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <http://www.old.tusur.ru/ru/science/education/dissertations/> и в библиотеке ФГБОУ ВПО «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «01» июня 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение устойчивой работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в условиях воздействия электромагнитных помех актуально в связи с интеграцией компонентов и ростом плотности монтажа печатных плат (ПП). Использование интегральных схем (ИС) снижает массу и габариты РЭА, но увеличивает восприимчивость к электромагнитному полю (ЭМП). Кроме того, тенденция повышения быстродействия цифровых схем и рабочих частот аналоговых схем предъявляет более жёсткие требования к электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭА. Для обеспечения ЭМС применяют экранирование пластиной или корпусом. В его исследование внесли вклад Бутин В.И., Гизатуллин З.М., Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю., Шапиро Д.Н., Araneo R., Azizi H., Celozzi S., Kaden H., Robinson M.P., Schelkunoff S.A., Shi D., Thomas D.W.P., Ott H.W. и др. Однако оно часто требует индивидуального конструкторского решения с тщательным моделированием для каждого устройства. Поэтому совершенствование экранирования РЭА остаётся актуальным. Из-за сложности вычисления эффективности экранирования (ЭЭ) разработчиками не всегда своевременно принимаются должные решения для обеспечения ЭМС устройств в целом, что в значительной мере увеличивает стоимость их разработки на конечном этапе проектирования. В бортовой РЭА космического аппарата (КА) для уменьшения массы используют композитные материалы в качестве экранов. Однако их радиочастотные свойства мало исследованы, и для экранирования на низких частотах чаще используют конструкции из металла. Так, от 13 до 18% массы всего КА приходится на экранирующие конструкции, что требует уменьшения плотности металла и толщины экрана. Таким образом, сложно переоценить важность экранирования для РЭА в целом, а задача экранирования бортовой РЭА остается одной из самых актуальных. Поэтому важно тщательное моделирование ЭЭ в диапазоне параметров бортовой РЭА КА, позволяющее до изготовления и проведения натурных испытаний бортовой РЭА КА сделать предварительные оценки ЭЭ.

РЭА КА проходит комплекс испытаний, в т.ч. на ЭМС. При помощи ТЕМ-камер можно проводить измерения помехоэмиссий и помехоустойчивости ИС с целью предотвращения сбоев и сохранения характеристик. В исследование этих вопросов внесли вклад Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю., Комягин С.И., Рахаева Е.А., Alotto P., Crawford M.L., Pouhe D., Malaric K., Montrose M.I., Ott H.W., Pouhe D. и др. Однако необходимо совершенствование как самих ТЕМ-камер, так и испытаний на ЭМС, приближая испытания к более реальным условиям эксплуатации, при которых каждый работающий блок или узел изделия создаёт вокруг себя не только электромагнитные, но и тепловые поля, которые влияют на работу. Поэтому, важно испытывать РЭА на одновременное воздействие электромагнитного и теплового полей, имитируя реальные условия эксплуатации, что позволит выявить наиболее чувствительные компоненты и осуществить оценку их электромагнитной стойкости. Пока такие испытания не проводятся, т.к. нет устройств для этого, но они необходимы, в т.ч. и для биомедицинских исследований.

Цель работы – выполнить анализ ЭЭ бортовой РЭА КА, а также создать устройства для испытаний на ЭМС и биомедицинских исследований с возможностью климатических воздействий на объект. Для её достижения надо решить следующие задачи: разработать методику для быстрой оценки ЭЭ металлической пластиной и корпусом с апертурой; предложить способы повышения ЭЭ корпусов с апертурой, используемых в бортовой РЭА КА; разработать устройства на основе линии передачи с повышенными техническими характеристиками относительно существующих; разработать устройство для испытаний РЭА на совместные климатические и электромагнитные воздействия с возможностью, а также биомедицинских исследований.

Научная новизна

1. Разработана методика анализа ЭЭ бортовой РЭА КА, отличающаяся использованием аналитического, квазистатического и электродинамического подходов.

2. Выявлены особенности частотных зависимостей ЭЭ: металлической пластины; корпуса соединителя; унифицированного электронного модуля (УЭМ), корпуса блока системы автономной навигации (САН).

3. Предложена методика оптимизации геометрических размеров ТЕМ-камеры, отличающаяся совместным использованием аналитического, квазистатического и электродинамического подходов.

4. Разработаны ТЕМ-камеры для испытаний на ЭМС и биомедицинских исследований с возможностью климатических воздействий на объект.

Теоретическая значимость

1. Получено в замкнутом виде выражение для связи апертуры с корпусом в аналитической модели для ЭЭ корпусом с апертурой.

2. Применительно к оптимизации структуры и геометрических размеров ТЕМ-камеры результативно использован комплекс численных методов.

3. Показано, что нанесение мюметалла на внутренние боковые стенки ТЕМ-камеры позволяет снизить $|S_{11}|$ и расширить рабочий диапазон частот.

Практическая значимость

1. Разработаны программные модули, позволяющие выполнить быструю оценку ЭЭ для различных геометрических размеров корпуса с апертурой и материалов для разных полей, которые позволили выполнить оценку и дать рекомендации по повышению ЭЭ реальной бортовой РЭА КА для АО «ИСС».

2. Показано, что при экранировании металлической пластиной переход от алюминия к более легкому сплаву магния ухудшает экранирование.

3. Приведены рекомендации по повышению (до 20 дБ) ЭЭ корпуса СНП 339 на частотах до 1 ГГц.

4. Применение аналитического выражения для расчета резонансов корпуса и аналитической модели для вычисления ЭЭ прямоугольного корпуса с апертурой в системе TALGAT позволяет произвести их быструю оценку.

5. Обнаружены локальные места проникновения ЭМП внутрь корпуса САН.

6. Приведены рекомендации по увеличению ЭЭ корпусом с апертурой.

7. Разработаны электродинамические и твердотельные модели ТЕМ-камер для вычисления оптимальных геометрических размеров, на основе которых может быть изготовлена ТЕМ-камера для высоты испытуемого объекта (ИО) от 5 мм до 40 мм.

8. Разработана конструкция ТЕМ-камеры, которая превышает характеристики существующих камер по диапазону частот (до 2 ГГц) и высоте ИО (до 20 мм) и пригодна для исследований и испытаний на ЭМС ИС, небольших РЭС, а также биологических объектов (БО), представляющих собой клетки и ткани живых организмов и растений.

9. Разработаны ТЕМ-камера, на внутренних боковых стенках которой нанесен мюметалл, с рабочим диапазоном частот до 3 ГГц, и миниатюрные ТЕМ-камеры для измерения ЭЭ материалов и БО высотой до 5 мм при $|S_{11}|$ не превышающем минус 20 дБ в диапазоне частот до 7 ГГц.

10. Патент на изобретение: климатическая экранированная камера (КЭК).

11. Разработаны облик, технические требования, схемы и методы применения КЭК для испытаний на ЭМС с одновременным климатическим воздействием на ИО, а также для биомедицинских исследований.

12. Камера позволит получить новые знания о взаимовлиянии внутренних и внешних электромагнитных и климатических воздействий на ИО.

13. Результаты использованы в учебном процессе двух университетов.

14. Разработаны макеты ГТЕМ-камеры и полосковой линии (ПЛ).

Методология и методы исследования. В работе применены метод конечных элементов, метод матриц линий передачи, метод моментов, теория линий передачи, натурный эксперимент.

Положения, выносимые на защиту

1. Переход в бортовой РЭА от алюминия к более легкому сплаву магния МА2-1 ухудшает экранирование пластиной из этих металлов, что может оказаться критичным для экранирования низкочастотного магнитного поля.

2. Предложенная методика анализа ЭЭ позволяет оценивать ЭЭ элементов бортовой РЭА КА.

3. Предложенная методика оптимизации геометрических размеров ТЕМ-камеры позволила создать ТЕМ-камеру с $|S_{11}|$ менее минус 20 дБ в рабочей полосе частот до 2 ГГц и высотой ИО до 20 мм.

4. Разработанные ТЕМ-камеры позволяют проводить испытания на ЭМС и биомедицинские исследования с возможностью климатических воздействий на объект.

Достоверность результатов основана на корректном использовании метода конечных элементов, метода моментов, метода матриц линий передачи, теории линий передачи, а также на согласованности результатов моделирования разными численными методами в нескольких программных продуктах и совпадении результатов моделирования и натурального эксперимента.

Использование результатов исследований

1. ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной

совместимости и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор 95/10 от 24.11.2010 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

2. ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

3. Проект «Развитие объектов инновационной инфраструктуры ТУСУРа, включая технологический бизнес-инкубатор, обеспечивающей укрепление кооперации университета с промышленными предприятиями в создании высокотехнологичных производств и целевой подготовке кадров по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий РФ» в рамках реализации Постановления 219 Правительства РФ в 2011–2012 гг.

4. Составная часть ОКР «Разработка материалов в эскизный проект ОКР «Развитие наземного сегмента космического комплекса системы ГЛОНАСС» в части создания составных частей сети наземных станций контроля и управления БАМИ». хоздоговор 25/13 между ТУСУРОм и АО «ИСС».

5. Подпроект 2.2.1.3 «Разработка комплекса учебно-методического и программного обеспечения для исследования и проектирования инновационных устройств с учётом электромагнитной совместимости» на 2013 г. в рамках программы стратегического развития ТУСУРа 2012–2016 гг.

6. НИР «Создание климатической экранированной ТЕМ-камеры», грант «УМНИК», 2014–2016 гг.

7. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по математическому моделированию, ориентированных на электромагнитную совместимость бортовой аппаратуры перспективных космических аппаратов», грант РФФИ 13-07-98017, 2012–2014 гг.

8. НИР «Комплексные исследования по разработке алгоритмов, математического обеспечения и средств проектирования для создания новых элементов защиты и контроля вычислительных систем на основе модальных явлений», грант РФФИ 14-29-09254, 2014–2016 гг.

9. НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РФФИ 14-19-01232, 2014–2016 гг.

10. НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

11. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР.

12. Учебный процесс НИ ТГУ: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Космические промышленные системы» для предприятия «Газпром космические системы», г. Королев.

13. Регистрация программ для ЭВМ: получено 8 свидетельств.

14. Патенты: получено 1 изобретение, поданы 3 заявки на изобретения.

Использование результатов подтверждено 6 актами внедрения.

Апробация результатов. Подготовка заявок и победа в конкурсах: научных достижений молодых ученых Томской обл., 2013 г.; УМНИК, 2014–2016 гг.; на стипендию Правительства РФ студентам и аспирантам, 2014, 2015 гг.; грантов РФФИ, проекты №13-07-98017, №14-29-09254; гранта РНФ, проект №14-19-01232; по проектной части государственного задания Минобрнауки России №8.1802.2014/К; по отбору и на участие в конкурсе ПРО: Регион 2015 г.

Результаты представлялись в материалах Межд. симп. по электромагн. совмест. и электромагн. экол. г. Санкт-Петербург, 2011 г. и конференций: Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2011–2013, 2015 гг.; Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2012, 2015 гг.; Всерос. науч.-практ. конф. «Разработка и производство отечественной электронной компонентной базы», г. Омск, 2014 г.; Всерос. науч.-техн. конф. «Связь в высоких широтах», г. Омск, 2014 г.; Всерос. науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск, 2014 г.; Общерос. молодёжная науч.-техн. конф. «Молодёжь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 2014 г.; Int. Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications, г. Лондон (Англия), 2014 г.; Int. Conf. on Applied Physics, Simulation and Computers, г. Вена (Австрия), 2015 г.; Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics, г. Родос (Греция), 2015 г.; Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Эрлагол (Алтай), 2015 г.; Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications, г. Оттава (Канада), 2015 г.; Int. Conf. on Biomedical Engineering and Computational Technologies, г. Новосибирск (Россия), 2015 г., Int. Siberian Conf. on Control and Communications, г. Москва (Россия), 2016 г.

Публикации. Результаты опубликованы в 50 работах: 6 статей в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в другом журнале; 1 патент; 8 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 3 доклада в трудах зарубежных конференций; 28 докладов и 2 тезисов в трудах отечественных конференций.

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или при его участии. Цель и задачи сформулированы с Т.Р. Газизовым. Реализация программных модулей выполнена с С.П. Куксенко. Моделирование ЭЭ, разработка ТЕМ- и ГТЕМ-камер, КЭЖ, обработка и интерпретация результатов выполнены лично автором. Часть результатов получена совместно с соавторами публикаций.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 3 главы, заключение, список литературы из 260 наим., приложение на 30 с. Объём диссертации с приложением – 216 с., в т.ч. 107 рис. и 15 табл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор методов анализа ЭЭ и устройств для испытаний на ЭМС

В разделе 1.1 показана актуальность экранирования бортовой РЭА и испытаний в области ЭМС. В разделе 1.2 рассмотрены методы анализа ЭЭ металлической пластиной и корпуса с апертурой, приведены стандарты по измерению ЭЭ, выполнен патентный поиск по экранированию. В разделе 1.3 приведены характеристики существующих устройств на основе линий передачи и описана методика расчета ТЕМ-камеры. В разделе 1.4 показана необходимость совместных климатических и электромагнитных испытаний на ЭМС, а также исследований по воздействию ЭМП на БО в климатически заданной обстановке. В разделе 1.5 сформулированы цель и задачи работы.

2. Анализ ЭЭ элементов конструкций бортовой РЭА КА

2.1 Металлическая пластина

Реализован программный модуль и вычислены частотные зависимости ЭЭ электрического, магнитного и электромагнитного полей пластинами из алюминия и сплава магния МА2–1, широко используемых в бортовой РЭА КА, для разных толщин и расстояний, в диапазоне частот от 10 кГц до 18 ГГц. Получены 432 зависимости ЭЭ. Наименьшее значение имеет ЭЭ магнитного поля, причем переход от алюминия к сплаву магния уменьшает ЭЭ на 8–23 дБ с ростом толщины и расстояния. Этот переход может быть критичным для экранирования низкочастотного магнитного поля, а источники больших токов вблизи плоского экрана могут влиять на низкоомные контуры за экраном. С помощью разработанного модуля для вычисления ЭЭ металлической пластиной выполнена оценка влияний с одной стороны блока САН на другую. Вычислены частотные зависимости ЭЭ металлического основания и крышки блока САН, аппроксимированные сплошной бесконечной металлической пластиной из сплава магния МА2-1. Показано, что наименьшие значения ЭЭ имеет крышка корпуса, причем для магнитного поля и частот 1–100 Гц ЭЭ очень низка (0–6 дБ) и слабо зависит от частоты для всех расстояний, кроме самого большого (1000 мм), где монотонно возрастает до 18 дБ. Для частот 0,1–10 кГц значение ЭЭ слабо зависит (6–8 дБ) от частоты для 1 мм, тогда как с удалением значение ЭЭ возрастает все сильнее, но по-разному для каждого расстояния. При этом зависимость от расстояния имеет минимум. В диапазоне 0,01–1 МГц ЭЭ одинаково монотонно возрастает для всех расстояний (до значения 100 дБ при $r=1$ мм и 165 дБ при $r=1000$ мм на частоте 1 МГц). Для электрического и электромагнитного полей ЭЭ высока.

2.2 Корпус с апертурой

Вычислена ЭЭ корпусом с пластиной и диэлектриком в апертуре. Программно реализованы 2 модели для быстрой оценки ЭЭ корпуса с апертурой в стенке. Для комбинированного метода, позволяющего получить частотную зависимость ЭЭ с произвольным расположением апертуры в стенке корпуса со стороны падения плоской волны, получено в замкнутом виде выражение коэффициента связи апертуры с корпусом, для волны TE_{10} :

$$C_{ma} = \left(\frac{\cos\left(\pi \cdot \left(\frac{Y}{a} + \beta\right)\right)}{a-l} - \frac{\sqrt{\cos^2\left(\pi \cdot \left(\frac{Y}{a} - \beta\right)\right)}}{a+l} \right) \cdot \frac{a \cdot l^2}{\pi \cdot X \cdot Y} \cdot \sqrt{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot w \cdot (a-l)}{2 \cdot a \cdot l}\right)}, \quad (2.1)$$

где X, Y – координаты центра апертуры; a – ширина стенки; l, w – ширина и высота апертуры; $\beta = (X - Y)/l - 0,5$.

2.3 Корпус соединителя бортовой РЭА космического аппарата

Для корпуса СНП 339 (рисунок 2.2а) вычислены резонансные частоты и ЭЭ, используя (2.1), при полном и уменьшенном раскрывах апертуры со стороны кабеля, в диапазонах частот f_1 (10 кГц–1 МГц) и f_2 (1 МГц–1 ГГц), в начале, середине и конце корпуса (рисунок 2.1). Показана согласованность зависимостей, полученных программой CST MWS и реализованным модулем. В самой удаленной точке наблюдаются максимальные отличия: 10 дБ – до 1 МГц и 6 дБ – до 1 ГГц. В диапазоне 1–20 ГГц характер зависимостей сохраняется, но значения ЭЭ на частотах резонансов отличаются до 20 дБ. Среднее время вычисления частотной зависимости, в двух диапазонах частот при количестве точек 1000, составило в разработанном модуле 4 с, а в CST MWS – 1864 с, т.е. получено ускорение в 466 раз. Таким образом, на основе реализованных модулей получены быстрые оценки ЭЭ бортовой РЭА КА. Сравнение частотных зависимостей ЭЭ, полученных разными методами (таблица 2.1) показало в диапазонах f_1 и f_2 , при вычислении с использованием (2.1) (разработанный модуль), отличие от результатов CST MWS менее 3 дБ, для всех точек наблюдения, кроме самой дальней, где оно составляет 11,8 дБ. Различие значений, полученных по модели *Robinson M.P. et al*, по сравнению с CST MWS в диапазоне частот f_1 не превышает 14,4 дБ, а в диапазоне f_2 – 22,5 дБ, что значительно выше, чем 11,8 дБ при использовании предложенной модели с (2.1) (таблица 2.1). В диапазоне f_3 (1 ГГц–20 ГГц), различие значений ЭЭ, полученных разработанным модулем и CST MWS, сохраняется около 10–15 дБ до частоты первого резонанса, но на частотах резонанса возрастает до 20 дБ. Различие значений ЭЭ, в диапазоне f_3 для модели *Robinson M.P. et al* и CST MWS возрастает до 35 дБ.

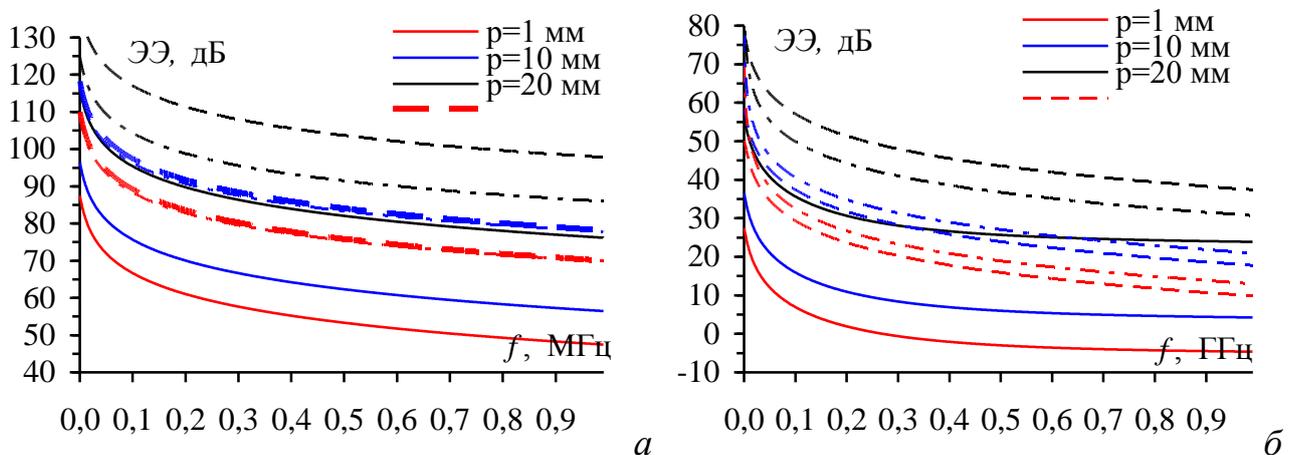


Рисунок 2.1 – Частотные зависимости ЭЭ корпуса соединителя в диапазонах частот f_1 (а) и f_2 (б), при изменении расстояния p (— *Robinson M.P.*, --- *CST MWS*, - · - · - Разраб.)

Таблица 2.1 – Значения ЭЭ, дБ
для корпуса соединителя

f , МГц	1		1000	
r , мм	1	20	1	20
Robinson M.P.	-4,6	23,9	47,5	76,2
CST MWS	9,8	37	70	97,8
Разработ.	12	30,5	69,9	86

Вычислены значения ЭЭ в начале и середине корпуса соединителя при апертурах 2–8 мм с шагом 1 мм. Показано, что на частотах до 1 ГГц при апертуре 2 мм значение ЭЭ увеличивается, по сравнению с полным раскрытием, на 20 дБ, а между резонансными частотами – на 10 дБ, тогда как на частотах

резонанса корпуса экранирование может ухудшиться. Таким образом, ЭЭ корпуса соединителя может быть повышена на 20 дБ, в диапазоне до 1 ГГц.

2.4 Унифицированный электронный модуль космического аппарата

Аналогично выполнена быстрая оценка резонансных частот и ЭЭ корпусов УЭМ семи разных размеров (рисунок 2.2б). Оказалось, что первые резонансные частоты довольно низки, ЭЭ монотонно убывает до частоты первого резонанса, а вблизи резонансных частот резко ухудшается. Построены диаграммы направленности на резонансных частотах корпуса радиотракта на ПП из АО «ИСС» (рисунок 2.2в). Приведены рекомендации для повышения ЭЭ УЭМ.

2.5 Корпус блока системы автономной навигации космического аппарата

Вычислена ЭЭ корпуса САН (рисунок 2.2г). Их анализ показал, что при щели 0,3 мм между основанием и крышками ЭЭ на частотах полезного сигнала 1,5–1,7 ГГц минимальна, а в некоторых местах отрицательна. Особенно критичны места расположения навигационного процессора и центральная часть корпуса, с ЭЭ= –20 дБ. Около соединителей платы аналоговой обработки сигнала ЭЭ= –6 дБ, а в месте расположения приемных устройств навигации ЭЭ≈ 0 дБ. Вычислены и представлены карты напряженности поля на поверхности корпуса, выявлены локальные места проникновения ЭМП внутрь корпуса САН, оказавшиеся вблизи радиотракта и процессоров. Для повышения ЭЭ рекомендовано сделать соединительный паз, уменьшить расстояние между крепежными элементами и везде использовать экранирующие прокладки.

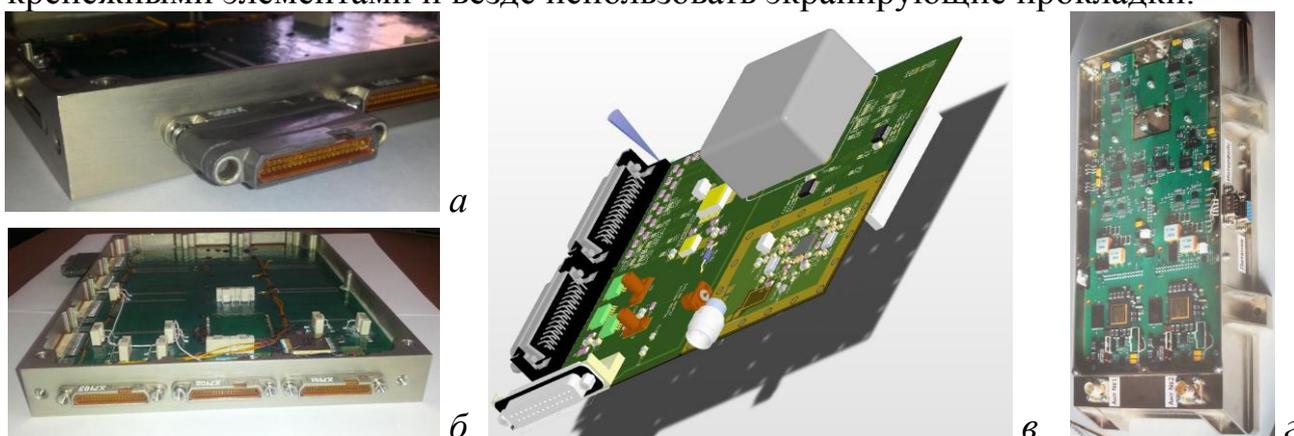


Рисунок 2.2 – Устройства: СПП 339 (а), УЭМ (б), блок радиотехнический (в) и САН (г) бортовой РЭА КА, на которых апробировано вычисление ЭЭ

2.6 Методика анализа ЭЭ элементов конструкций космического аппарата

На основе разработанных модулей и выполненных анализов ЭЭ различных элементов конструкции бортовой РЭА КА разработана методика анализа ЭЭ (рисунок 2.3) для получения предварительных (грубых) и окончательных

(точных) значений ЭЭ корпуса устройства. Для предварительных оценок выполняются: вычисление ЭЭ металлической пластиной (1); анализ конструкции корпуса (2) с вычислением его размеров и резонансных частот; анализ стенок (3) и апертур (4) в корпусе, подвергаемых воздействию ЭМП; вычисление ЭЭ (5) при помощи разработанного модуля на основе модели *Robinson M.P. et al.*; анализ частотных зависимостей ЭЭ корпуса с апертурой (6); вычисление точных и быстрых предварительных оценок ЭЭ (8), используя (2.1). Для получения окончательных результатов выполняются: создание модели с добавлением внутренних элементов конструкции (9) при помощи системы автоматизированного проектирования; изменения размеров корпуса с учетом неконтролируемых параметров из-за обработки металла (10); добавление моделей элементов электронной компонентной базы, герметизации и диэлектрических заполнений в апертуре корпуса (11); электродинамический анализ ЭЭ конструкции в целом и применения мер повышения ЭЭ (12). Результатами применения методики анализа ЭЭ являются: значения ЭЭ в заданном диапазоне частот для выбранного материала, который в случае малой ЭЭ может быть заменен на другой; рекомендации по выбору размеров корпуса и апертур в его стенках с учетом рабочих частот устройства, располагаемого в анализируемом корпусе; повышение значений ЭЭ с применением дополнительных мер (7) для повышения ЭЭ корпуса целом.

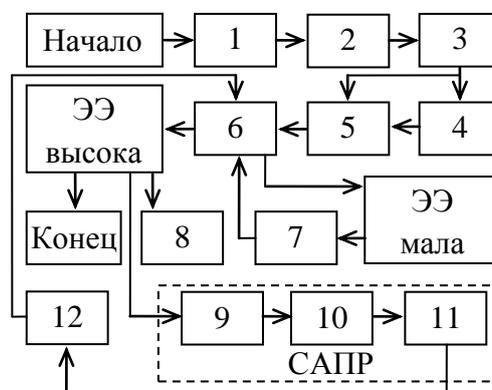


Рисунок 2.3 – Методика анализа ЭЭ элементов конструкций КА

3. Устройства для испытаний на ЭМС

3.1 ТЕМ-камера

Предложена методика с применением аналитического, квазистатического и электродинамического подходов, позволяющая учитывать реальные неточности, возникающие при создании сложных форм конструкций волноводов из металла, и предложен алгоритм оптимизации их геометрических параметров. Также, с помощью методики можно оценить изменения частотной зависимости $|S_{11}|$ вследствие реализации твердотельной модели со всевозможными изменениями заготовки, с целью придания ей формы на основе электродинамической модели. По методике разработаны электродинамические и твердотельные модели для изготовления ТЕМ-камер с высотой ИО 5–40 мм. Выполнены аналитические оценки размеров таких ТЕМ-камер и их корректировки при помощи квазистатического моделирования (погрешность аналитики относительно квазистатики – менее 5 %). В программе CST MWS созданы модели и выполнена параметрическая оптимизация (при помощи разработанного алгоритма) центральной и сужающихся частей, а также сборки в целом для 50-омной ТЕМ-камеры, в рабочем диапазоне частот до 2 ГГц, при высоте ИО 20 мм. Выполнен анализ соотношений сторон поперечного сечения электродинамической модели ТЕМ-камеры. Приведены частотные зависимости

$|S_{11}|$ оптимизированной ТЕМ-камеры, для соотношений ширины и высоты корпуса 1,27 при $|S_{11}| < -33$ дБ до 1,8 ГГц и 1,15 при $|S_{11}| < -24$ дБ до 2 ГГц. Представлены размеры для обеих камер, которым разработана твердотельная модель ТЕМ-камеры для частот до 2 ГГц. Методика создания твердотельной модели позволила учесть характеристики реальных слесарных и сварочных инструментов (точность гидроабразивного реза (0,1 мм), угол и возможности гибочного станка, сварка металла), а также увеличение кромок металла в результате его растяжения или сжатия. По методике создана ТЕМ-камера (рисунок 3.1а) с характеристиками выше чем у стандартной (рисунок 3.1б) и существующих (таблица 3.1). Камера имеет $|S_{11}| < -20$ дБ в диапазоне частот до 2 ГГц, при максимальной высоте ИО 20 мм. Приведены вычисленные значения ЭЭ и карты E -поля в центре ТЕМ-камеры с неравномерностью ± 6 дБ, что соответствует стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость ИС. Поэтому она пригодна для исследований и испытаний ИС, малогабаритной РЭА, а также БО, представляющих собой клетки и ткани живых организмов и растений.

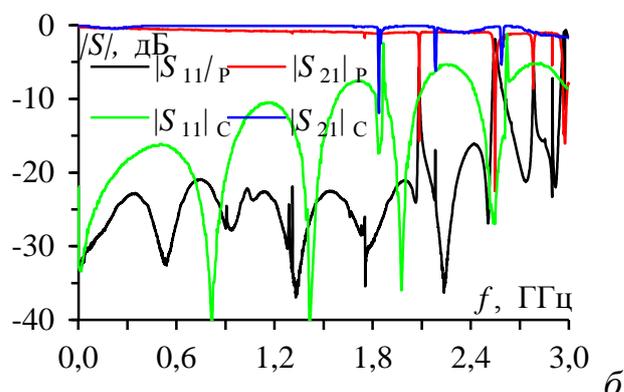


Рисунок 3.1 – ТЕМ-камера (а) и её измеренные (Р) частотные зависимости S -параметров в сравнении со стандартной (С) по SAE 1752/3 (б)

Приведены примеры использования разработанной ТЕМ-камеры с измерительным приемником Rohde&Schwarz ESR: при измерении эмиссий от сотового телефона; с генератором импульсного напряжения ГИН-1-1 (FID Technology) при исследовании влияния импульсного ЭМП на функциональное состояние митохондрий печени мышей в ТЕМ-камере.

Разработана ТЕМ-камера, на внутренних боковых стенках которой нанесен мюметалл, что позволило расширить диапазон рабочих частот до 3 ГГц при $|S_{11}| < -15$ дБ. Разработаны миниатюрные ТЕМ-камеры, для измерения ЭЭ материалов и БО высотой до 5 мм, при $|S_{11}| < -20$ дБ до 7 ГГц.

Таблица 3.1 – Сравнение характеристик ТЕМ-камер ($Z=50$ Ом)

Параметр	Разработанное устройство	IFI CC-110EXX	FCC-ТЕМ-JM3	TekBox ТВТС 1
Максимальная частота, МГц	2000	2000	2000	2000
КСВН	1,22	1,25	1,25	1,33
Высота ИО (d), мм	20	18	10	16,7
Габариты В×Ш×Г, мм	124×146×360	152,4×229×478	99×152×338	108×200×390

3.2 Устройства для климатических и электромагнитных воздействий

Разработана КЭК (рисунок 3.2) для совместных климатических и электромагнитных испытаний, а также биомедицинских исследований. Она позволит получить новые знания о взаимовлиянии внутренних и внешних электромагнитных и климатических воздействий на неё и ИО в ней. Представлены облик КЭК, конструкция, описание, принцип действия, разработаны технические требования, приведены технические характеристики и разработаны методы применения КЭК для испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость при одновременном воздействии температурного поля на ИО, а также для биомедицинских исследований.

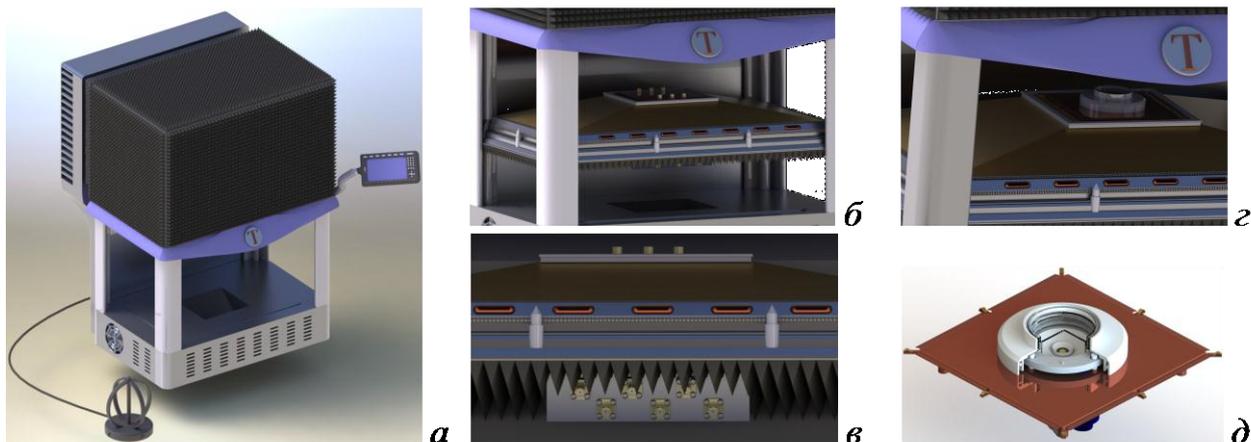


Рисунок 3.2 – Облик КЭК (а), вид с открытой дверью (б), вид двери со стороны соединителей (в), совместно (г) со столом для БО (д)

Для ТЕМ-камеры выполнено моделирование охлаждения до минус 50°C и нагрева до $+150^{\circ}\text{C}$ с оценкой изменения её размеров. Создано устройство для термоконтактной системы КЭК. Разработаны платы управления и Н-моста, управляющие большим количеством элементов Пельтье (ЭП) на поверхности ТЕМ-камеры. Разработан Н-мост, управляемый одним сигналом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для инверсии тока через ЭП логическим уровнем. Разработаны структурная схема, алгоритм работы, ПО и выполнено моделирование пятифазного ШИМ регулятора, позволяющего стабилизировать

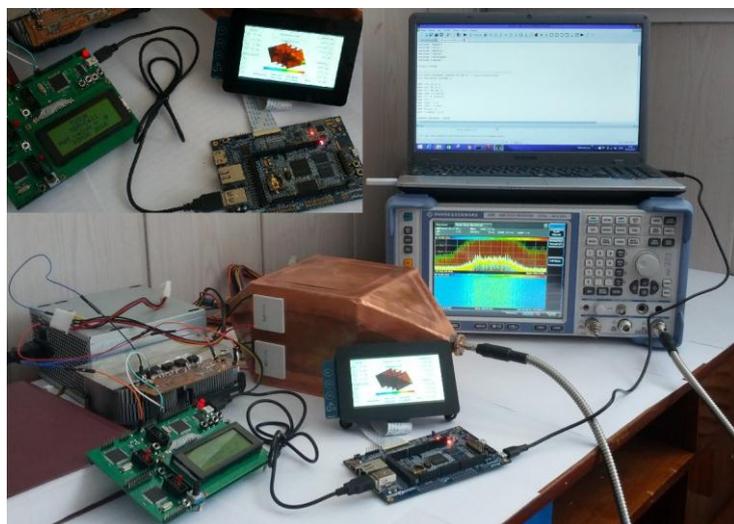


Рисунок 3.3 – Лабораторный макет терморегулятора

($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) температуру в ТЕМ-камере в диапазоне от -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$ и снизить пиковую нагрузку на источник питания в 5 раз. Создан лабораторный макет терморегулятора (рисунок 3.3) для КЭК, показавший достижение температур от $+2^{\circ}\text{C}$ до $+125^{\circ}\text{C}$ (при комнатной температуре без радиаторного блока на ЭП диапазон отрицательных температур не задавался).

3.3 ГТЕМ-камера

Выполнено моделирование основных элементов конструкции и получены предварительные оптимальные параметры, на основе которых разработан лабораторный макет открытой ГТЕМ-камеры высотой ИО до 250 мм (рисунок 3.4а). Вычислены E -поле и частотная зависимость $|S_{11}|$ (рисунок 3.4б). (Значительные отражения до 0,8 ГГц связаны с рассогласованием конца центрального проводника (нет сужающихся частей) с нагрузкой 50 Ом.)

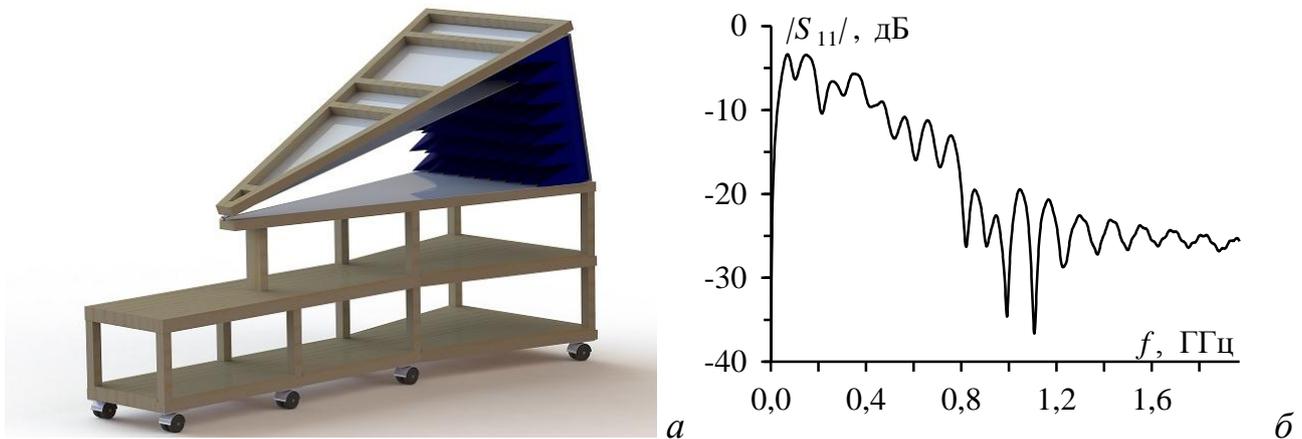


Рисунок 3.4 – Модель макета (а) и частотная зависимость $|S_{11}|$ (б) ГТЕМ-камеры

3.4 Полосковая линия

Разработана усовершенствованная (относительно исходной из нормативного документа) модель (рисунок 3.5а) ПЛ для испытаний на ЭМС. Вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ для обеих моделей (рисунок 3.5б): для разработанной $|S_{11}| < -22$ дБ, а для исходной – $|S_{11}| < -19$ дБ до 400 МГц.

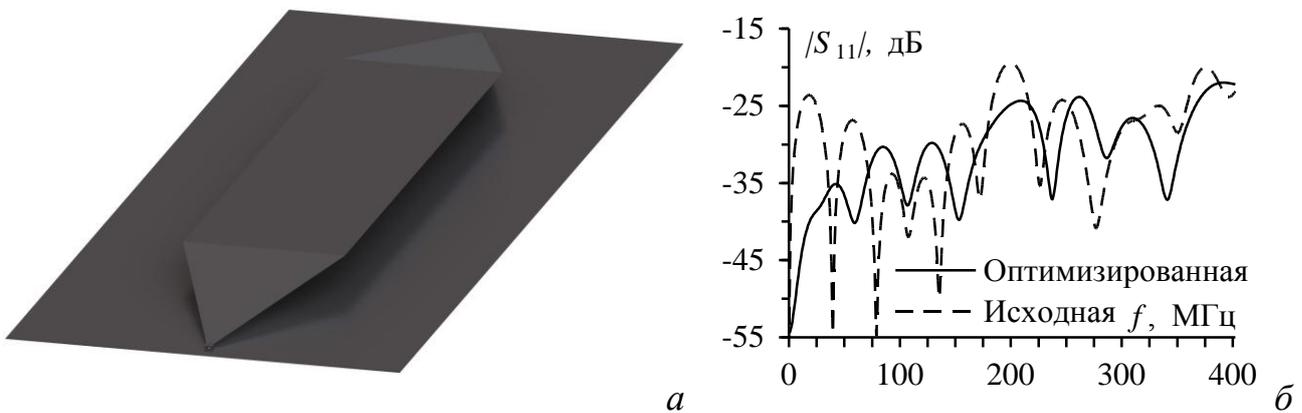


Рисунок 3.5 – Модель лабораторного макета (а) и частотные зависимости $|S_{11}|$ (б) ПЛ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты совершенствования анализа ЭЭ: получено в замкнутом виде выражение для коэффициента связи апертуры с корпусом, позволяющее реализовать быструю оценку ЭЭ корпусом с апертурой в диапазоне частот от 10 кГц до 20 ГГц; выполнена программная реализация представленных моделей в виде модулей, позволяющих быструю оценку ЭЭ прямоугольного металлического корпуса с апертурой, а также пластины из различных металлов для электрического, магнитного и электромагнитного

полей; показано, что зависимости, полученные при помощи электродинамического анализа и реализованного модуля согласуются, а на основе реализованных модулей получают полезные оценки ЭЭ бортовой РЭА КА; показано, что при экранировании металлической пластиной переход от алюминия к более легкому сплаву магния ухудшает ЭЭ и может оказаться критичным для экранирования низкочастотного магнитного поля; вычислена ЭЭ корпуса САН и предложены рекомендации по её повышению.

Приведены результаты проектирования устройств для испытаний на ЭМС на основе линий передачи: представлены алгоритм и методика, позволяющие оптимизировать структуру и геометрические параметры ТЕМ-камеры с применением численных методов, учитывая реальные неточности, возникающие при создании сложных форм конструкций волноводов из металла; разработаны электродинамические и твердотельные модели ТЕМ-камер для высоты ИО от 5 до 40 мм; создана ТЕМ-камера с более высокими характеристиками, чем у существующих, пригодная для исследований и испытаний согласно стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость ИС, малогабаритной РЭА, а также БО; разработана ТЕМ-камера, на внутренних боковых стенках которой нанесен мюметалл, что позволило расширить диапазон рабочих частот до 3 ГГц при $|S_{11}| < -15$ дБ; разработаны миниатюрные ТЕМ-камеры, для измерения ЭЭ материалов и БО высотой до 5 мм, при $|S_{11}| < -20$ дБ до 7 ГГц; разработана КЭК для совместных климатических и электромагнитных испытаний на ЭМС и биомедицинских исследований; представлен облик КЭК, разработаны технические требования, приведены технические характеристики и разработаны методики применения КЭК для испытаний на ЭМС и биомедицинских исследований.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Комнатнов М.Е. Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Доклады ТУСУР. – 2011. – №2(24), ч. 1. – С. 133–136.
2. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Известия вузов. Физика. – 2012. – Том 55, №7/2. – С. 89–92.
3. Комнатнов М.Е. Оценка эффективности экранирования корпуса соединителя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – №4. – С. 37–42.
4. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – №4(34), ч. 1. – С. 39–45.
5. Газизов Т.Р. Магистерская программа ТУСУРа «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко,

А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов, В.К. Салов // Технологии ЭМС. –2016. – №1(56). – С. 24–33.

6. Busygina A.V. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects / A.V. Busygina, M.E. Komnatnov, O.A. Matveyenko // Siberian scientific medical journal. – 2016. – Vol. 36, № 1. – P. 48–54.

Статьи в рецензируемом отечественном журнале

7. Газизов Т.Р. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов, и др. // Техника радиосвязи. – 2014. – №2(22). – С. 11–22.

8. Комнатнов М.Е. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3(23). – С. 84–91.

Патенты и свидетельства

9. Пат. №2558706 РФ. Климатическая экранированная камера / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов (РФ). – № 2014103639/07; заявл. 03.02.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. №22.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660373. TALGAT 2011. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 13 чел. Заявка №2012618426. Дата поступления 5.10.2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.11.2012 г.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619615. TALGAT 2012. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 13 чел. Заявка №2013617773. Дата поступления 29.08.2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.10.2013 г.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617440. SEbox. Авторы: Комнатнов М.Е, Газизов Т.Р., Куксенко С.П. Заявка №2014615102. Дата поступления 29 мая 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 июля 2014 г.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661616. Quasi-static simulation of TEM/GTEM-cells. Авторы: Комнатнов М.Е, Газизов Т.Р. Заявка №2014619247. Дата поступления 15 сентября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10 ноября 2014 г.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661022. SEplate. Авторы: Комнатнов М.Е, Газизов Т.Р., Куксенко С.П. Заявка №2015611288. Дата поступления 03 марта 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2015 г.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614365. TALGAT 2013. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 15 чел. Заявка №2015611288. Дата поступления 03.03.2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.04.2015 г.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617550. TALGAT 2014. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 17 чел. Заявка №2015614488. Дата поступления 27 мая 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 июля 2015 г.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660487. TALGAT 2015. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 17 чел. Заявка №2015617580. Дата поступления 17 августа 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1 октября 2015 г.

Доклады в трудах зарубежных конференций

18. Komnatnov M.E. Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // IEEE MTT-S Int. Microw. Workshop Series on RF and Wireless Techn. Biomed. Health. Applic. IMWS-BIO. England, London, 4–6 Dec., 2014. – 2014. – P. 1–4.

19. Gazizov T.R. Ensurance and simulation of electromagnetic compatibility: recent results in TUSUR University / T.R. Gazizov, A.O. Melkozerov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko, P.E. Orlov, V.K Salov, R. Akhunov, I. Kalimulin, R.S. Surovtsev, M.E. Komnatnov, A.T. Gazizov // Int. Conf. on Applied Physics, Simulation and Computers. Austria, Vienna, 15–17 March, 2015. – 2015. – P. 1–4.

20. Komnatnov M. Optimization of the TEM-cell for a new type of climatic chamber / M. Komnatnov, T. Gazizov, A. Melkozerov // Proc. of IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications. Canada, Ottawa, 11–14 Aug., 2015. – 2015. – P. 1–4.

Доклады в трудах отечественных конференций

21. Комнатнов М.Е. Сравнение производительности математических библиотек при использовании различных типов данных / М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2011». – Томск. – 2011. – С. 127–129.

22. Салов В.К. Ускорение вычислений в задачах моделирования ЭМС / В.К. Салов, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов и др. // Межд. симп. по электромагн. совмест. и электромагн. экол. – СПб. – 2011. – С. 269–272.

23. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования корпуса радиотракта на плате бортовой аппаратуры космического аппарата // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2012». – Томск. – 2012. – С. 94–96.

24. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования корпуса соединителя типа СНП // Мат. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2012. – С. 154–157.

25. Комнатнов М.Е. Обзор ТЕМ-камер, используемых при проведении испытаний на ЭМС // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2013». – Томск. – 2013. – С. 116–119.

26. Конюхов А.Л. Создание панорам изображений трасс обзора в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах / А.Л. Конюхов, М.Е. Комнатнов // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013». –Томск. – 2013. – С. 122–125.

27. Комнатнов М.Е. Обоснование целесообразности проведения совместного испытания на электромагнитные и температурные воздействия бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата // Труды VI общерос. молодежн. науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос». – СПб. – 2014. – С. 46–48.

28. Komnatnov M.E. Module for visual control of in vitro results of the joint impact of climatic and electromagnetic factors on living tissue / M.E. Komnatnov, A.V. Busygina // IEEE 16th Int. Conf. Micro/Nanotech. Electron. Devices EDM 2015, Russia, Erlagol. – 2015. – P. 576–579.

29. Busygina A.V. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects / A.V. Busygina, M.E. Komnatnov, O.A. Matveyenko // IEEE 2015 Int. Conf. Biomed. Eng. Comput. Tech. SIBIRCON – Russia, Novosibirsk. – 2015. – P. 134–138.

30. Белоусов А.О. Оценка перекрестных наводок в многопроводном межсоединении печатной платы системы автономной навигации / А.О. Белоусов, М.Е. Комнатнов, Р.С. Суровцев // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015». –Томск. – 2015. – С. 163–165.

31. Комнатнов М.Е. Устройство для визуального контроля результатов совместного влияния климатических и электромагнитных факторов на живые ткани / М.Е. Комнатнов, А.В. Бусыгина // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015». –Томск. – 2015. – С. 168–171.

32. Джанбаев К.Э. Моделирование дифференциальной пары на печатной плате системы автономной навигации / К.Э. Джанбаев, М.Е. Комнатнов, Р.С. Суровцев // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015». –Томск. – 2015. – С. 181–183.

33. Зырянова Н.А. Анализ влияния сопротивления нагрузок на временной отклик связанных линий печатной платы системы автономной навигации / Н.А. Зырянова, М.Е. Комнатнов, Р.С. Суровцев // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015». –Томск. – 2015. – С. 157–160.

34. Сагалаков Е.В. Электродинамическое моделирование полосковой линии для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость / Е.В. Сагалаков, М.Е. Комнатнов // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015». –Томск. – 2015. – С. 136–138.

35. Бебякина Е.В., Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-ячейке / Е.В. Бебякина, А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов // Мат. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2015. – С. 9–13.

36. Каргаполова Н.В. Портативный датчик напряженности электрического поля / Н.В. Каргаполова, М.Е. Комнатнов // Мат. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск – 2015. С. 25–30.

37. Матвеевко О.А. Разработка методологических подходов к изучению совместного влияния электромагнитных и климатических факторов на биологические объекты / О.А. Матвеевко, М.Е. Комнатнов // Мат. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2015. – С. 42–47.

38. Осинцев А.В. Программное обеспечение терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов // Мат. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2015. – С. 55–59.

39. Собко А.А. Терморегулятор для климатической экранированной камеры / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов // Мат. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2015. – С. 59–62.

40. Осинцев А.В. Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Демаков // Межд. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2016). – Рязань. – 2016, [принято к печати].

41. Собко А.А. Н-мост на мощных полевых транзисторах, управляемый одним ШИМ-сигналом / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов, А.В. Демаков, А.В. Осинцев // Межд. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2016). – Рязань. – 2016, [принято к печати].

42. Osintsev A.V. Temperature controller for external surface of waveguide / A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov // Proc. of Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – 2016. – Russia, Moscow. – P. 1–4.

43. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования металлическим корпусом с апертурами / М.Е. Комнатнов, Р.В. Рубченков, А.А. Иванов // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 306–309.

44. Балахнина Я.В. Измерение температуры объекта под воздействием электромагнитного поля в ТЕМ-камере / Я.В. Балахнина, А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 276–279.

45. Комнатнов М.Е. Плата управления терморегулятором климатической экранированной ТЕМ-камеры / М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 314–317.

46. Комнатнов М.Е. Модуль связи климатической экранированной ТЕМ-камеры / М.Е. Комнатнов, А.В. Осинцев, А.А. Собко // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 300–303.

47. Комнатнов М.Е. Обзор операционных систем реального времени / М.Е. Комнатнов, А.В. Осинцев, А.А. Собко // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 303–306.

48. Бебякина Е.В. Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-камере / Е.В. Бебякина, А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 279–281.

Тезисы в трудах отечественных конференций

49. Комнатнов М.Е. Сравнение производительности математических библиотек на примере решения систем линейных алгебраических уравнений / М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Сборник тез. докл. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС». – Железногорск. – 2011. – С. 396–398.

50. Почуев М.И. Предварительный анализ причин аномальной работы автогенератора Пирса / М.И. Почуев, М.Е. Комнатнов // Сбор. тез. докл. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС». – Железногорск. – 2014. – С. 90–92.