

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
Газизов Тальгат Рашитович

Томск – 2016

Оглавление

Введение.....	5
1. Обзор методов анализа эффективности экранирования и устройств для испытаний на электромагнитную совместимость.....	13
1.1 Актуальность экранирования и испытаний в области электромагнитной совместимости.....	13
1.2 Методы анализа эффективности экранирования.....	15
1.2.1 Экранирование прямоугольным корпусом с апертурой.....	15
1.2.2 Экранирование пластиной.....	22
1.2.3 Электродинамическое моделирование.....	26
1.2.4 Измерение эффективности экранирования.....	27
1.3 Устройства для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную совместимость.....	29
1.3.1 ТЕМ-камера.....	30
1.3.2 GTEM-камера.....	39
1.3.3 Полосковая линия.....	41
1.4 Совместные климатические и электромагнитные воздействия.....	43
1.4.1 Необходимость совместных испытаний радиоэлектронной аппаратуры.....	43
1.4.2 Исследования биологических объектов.....	53
1.5 Цель работы и постановка задач исследования.....	55
1.5.1 Экранирование.....	55
1.5.2 Устройства для проведения испытаний в области электромагнитной совместимости и исследований в биомедицине.....	56
2. Анализ эффективности экранирования элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.....	58
2.1 Металлическая пластина.....	58
2.2 Корпус с апертурой.....	64
2.2.1 Аналитическая модель для вычисления эффективности экранирования прямоугольным корпусом с апертурой.....	64
2.2.2 Корпус с пластиной и диэлектриком внутри апертуры.....	67
2.3 Корпус соединителя.....	69

2.4	Унифицированный электронный модуль	75
2.5	Корпус радиотракта на печатной плате	81
2.6	Корпус блока системы автономной навигации космического аппарата	84
2.7	Методика анализа эффективности экранирования элементов конструкций космического аппарата	93
2.8	Основные результаты главы	94
3.	Устройства для испытаний на электромагнитную совместимость	97
3.1	ТЕМ-камера	97
3.1.1	Методика оптимизации	97
3.1.2	Результаты моделирования и измерений	105
3.1.3	Примеры использования	117
3.2	Устройства для совместных климатических и электромагнитных воздействий	120
3.2.1	Технические требования	120
3.2.2	Конструкция и принцип работы	121
3.2.3	Элементы климатической экранированной камеры	134
3.2.4	Методы совместных климатических и электромагнитных исследований и испытаний	147
3.3	GTEM-камера	151
3.4	Полосковая линия	157
3.5	Основные результаты главы	158
	Заключение	160
	Список использованных источников	162
	Приложение	163

Обозначения и сокращения

ECSS	European Cooperation for Space Standardization
FEM	Finite Element Method
GTEM	Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
TLM	Transmission Line Matrix
АМ	Амплитудно-модулируемый
ВАХ	Вольтамперная характеристика
ДД	Динамический диапазон
ЖКД	Жидкокристаллический дисплей
ИВЭП	Источник вторичного электропитания
ИО	Испытуемый объект
ИП	Источник питания
ИС	Интегральная схема
КА	Космический аппарат
КИП	Контрольно-измерительный прибор
КСВН	Коэффициент стоячих волн по напряжению
КЭК	Климатическая экранированная камера
ЛУ	Логарифмический усилитель
МКР	Метод конечных разностей
МКЭ	Метод конечных элементов
МП	Микропроцессор
МЭК	Международный электротехнический комитет
ПИД	Пропорционально интегрально дифференцирующий
ПК	Персональный компьютер
ПП	Печатная плата
ПУ	Пульт управления
ПЧ	Полезная частота
РПМ	Радиопоглощающий материал
РЭА	Радиоэлектронная аппаратура
САН	Система автономной навигации
СВЧ	Сверхвысокочастотный
ТД	Температурный датчик
ТМ	Твердотельная модель
ТС	Техническое средство
УЭМ	Унифицированный электронный модуль
ШИМ	Широтно импульсная модуляция
ЭКБ	Электронная компонентная база
ЭМ	Электродинамическая модель
ЭМВ	Электромагнитная волна
ЭМИ	Электромагнитное излучение
ЭМП	Электромагнитное поле
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭСР	Электростатический разряд
ЭЭ	Эффективность экранирования

Введение

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 полупроводниковых компонентов и 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 всё более жёсткие требования к электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭА. Для решения этой задачи часто применяют экранирование пластиной или корпусом. Однако оно часто требует индивидуального конструкторского решения с тщательным моделированием для каждого устройства. Поэтому разработка новых методов оценки и устройств для экранирования РЭА – задача, которая в настоящее время остаётся актуальной. 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 в качестве экранов широко используют композитные материалы. 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 требуемого экранирования.

Надежное функционирование РЭА КА обеспечивается комплексом пройденных испытаний, в частности на ЭМС. При помощи ТЕМ-камер можно проводить измерения помехоэмиссий и помехоустойчивости ИС с целью предотвращения их сбоев и сохранения всех заданных эксплуатационных рабочих характеристик. 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 электромагнитное, но и тепловое поля, которые могут влиять на работу отдельных частей и системы в целом. Поэтому, важно проводить испытание РЭА на одновременное воздействие электромагнитного и температурного полей, имитируя реальные

условия эксплуатации, что позволит определить наиболее чувствительные компоненты и осуществить оценку их электромагнитной стойкости. На данный момент такие испытания не проводятся из-за отсутствия подобного вида устройств. Между тем они необходимы, поскольку приближают испытания устройства к реальным условиям эксплуатации, реализуя нестандартный, относительно нормативных документов, подход. Примечательно, что подобные устройства полезны и для биомедицинских исследований.

Цель работы – выполнить анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата, а также создать устройства для испытаний на электромагнитную совместимость и биомедицинских исследований с возможностью климатических воздействий на объект.

Для достижения поставленной цели необходимо 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 его применения для биомедицинских исследований.

Научная новизна

1. Разработана методика анализа эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата, отличающаяся использованием аналитического, квазистатического и электродинамического подходов.
2. Выявлены особенности частотных зависимостей эффективности экранирования: металлической пластины; корпуса соединителя; унифицированного электронного модуля, корпуса блока системы автономной навигации.
3. Предложена методика оптимизации геометрических размеров ТЕМ-камеры, отличающаяся совместным использованием аналитического, квазистатического и электродинамического подходов.
4. Разработаны ТЕМ-камеры для испытаний на электромагнитную совместимость 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 эффективности экранирования 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 коэффициент отражения 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 ОАО «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 393 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 блока 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 согласно стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость 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. Получен патент на изобретение: климатическая экранированная камера (КЭК).

11. Представлен облик, разработаны технические требования, приведены технические характеристики и разработаны методы применения КЭК для испытаний компонентов и небольших устройств на помехоэмиссию и помехоустойчивость 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, размещенный в её внутреннем объёме.

13. Результаты работы использованы в учебном процессе двух университетов.

14. Разработаны лабораторные макеты GTEM-камеры и полосковой линии.

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». х.д. 25/13 между ТУСУРом и ОАО «ИСС» им. акад. М.Ф. Решетнева».

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 реализации программы стратегического развития ТУСУРа 2012–2016 гг.

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

7. 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.

8. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по математическому моделированию, ориентированных на электромагнитную совместимость бортовой аппаратуры перспективных космических аппаратов», грант РФФИ 13-07-98017, 2012–2014 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 РНФ 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 НИ ТГУ: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Космические промышленные системы» для предприятия «Газпром космические системы», г. Королев.

12. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУР.

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

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Постановка цели работы, формулировка задач исследования и обоснование выполнены совместно с Т.Р. Газизовым. Программная реализация модулей вычисления ЭЭ выполнена совместно с С.П. Куксенко. Моделирование ЭЭ и разработка ТЕМ- и

ГТЕМ-камер, а также КЭК выполнены автором лично. Обработка и интерпретация результатов выполнены лично автором. Часть результатов получена совместно с соавторами публикаций.

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

Положения, выносимые на защиту

1. Переход в бортовой радиоэлектронной аппаратуре 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 эффективности экранирования позволяет оценивать эффективность экранирования элементов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

3. Предложенная методика оптимизации геометрических размеров ТЕМ-камеры позволила создать ТЕМ-камеру с модулем коэффициента отражения менее минус 20 дБ в рабочей полосе частот до 2 ГГц и высотой испытуемого объекта до 20 мм.

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

В работе применены системный подход, компьютерное моделирование, электродинамический и квазистатический анализы, вычислительный и натурный эксперименты.

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.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: Конкурс научных достижений молодых ученых Томской обл., 2013 г., «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса» (УМНИК) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, 2014–2016 гг.; Конкурс на назначение стипендии Правительства РФ студентам и аспирантам по приоритетным направлениям в 2014 и 2015 гг.; грантов РФФИ, проекты №13-07-98017, №14-29-09254; гранта РНФ, проект №14-19-01232; проектной части государственного задания Минобрнауки России №8.1802.2014/К, а также пройти конкурсный отбор и участвовать в конкурсе ПРО:Регион 2015 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих симпозиумов и конференций: Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2011–2013, 2015 гг.; Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2012, 2015 гг.; Всерос. научно-практ. конф. «Разработка и производство отечественной электронной компонентной базы («Компонент–2014»)), г. Омск, 2014 г.; Всерос. научно-техн. конф. «Связь в высоких широтах», г. Омск, 2014 г.; Всерос. научно-техн. конф. молодых специалистов ОАО «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 (IMWS-BIO), 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 (SIBIRCON), г. Новосибирск (Россия), 2015 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 50 работах (3 работы без соавторов):

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	6
Статья в других журналах	2
Патент на изобретение	1
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	8
Доклад в трудах зарубежных конференций	3
Доклад в трудах отечественных конференций	30
ИТОГО:	50

Краткое содержание работы. В введении представлена краткая характеристика работы. В гл. 1 выполнен обзор методик быстрого вычисления ЭЭ корпусом с апертурой и металлической пластиной. Произведён патентный поиск по экранированию по более чем тысяче патентов США, представлены наиболее важные аспекты. Выполнен обзор стандартов по измерению ЭЭ, существующих методов вычисления геометрических размеров устройств на основе линий передачи и их применения для конкретных задач. Представлена необходимость исследований и испытаний на совместные климатические и электромагнитные воздействия.

В гл. 2 вычислена ЭЭ для пластин из алюминия и сплава магния при их разных толщинах, расстояниях от источника до экрана в широком диапазоне частот. Представлены вывод

аналитического выражения для коэффициента связи корпуса с апертурой и методика быстрого вычисления ЭЭ корпуса с апертурой в диапазоне частот от 10 кГц до 20 ГГц. Произведено вычисление ЭЭ и резонансных частот семи корпусов УЭМ разных размеров, и приведены рекомендации по повышению ЭЭ. Вычислены резонансные частоты и ЭЭ корпусом соединителя типа СНП 339 при полном и уменьшенном раскрывах щели со стороны кабеля. Построены диаграммы направленности на резонансных частотах корпуса радиотракта, расположенного на ПП разработки ОАО «ИСС». Вычислены значения ЭЭ для корпуса блока системы автономной навигации.

В гл. 3 разработаны алгоритмы и методики оптимизации электродинамических и твердотельных моделей ТЕМ-камер, применимые для вычисления оптимальных геометрических размеров, на основе которых может быть изготовлена ТЕМ-камера, для любой высоты ИО. Создана ТЕМ-камера, которая превышает характеристики существующих камер по диапазону частот и высоте ИО и пригодна для исследований и испытаний согласно стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость ИС, небольшой РЭА, а также БО, представляющих собой клетки и ткани живых организмов и растений. Разработана ТЕМ-камера, на внутренних боковых стенках которой нанесен мюметалл, что позволило расширить диапазон рабочих частот до 3 ГГц. Разработаны миниатюрные ТЕМ-камеры для измерения ЭЭ материалов и БО высотой до 5 мм в диапазоне частот до 7 ГГц. Описаны результаты впервые разработанной климатической экранированной камеры (КЭК) для совместных климатических и электромагнитных испытаний на ЭМС. Представлен облик КЭК, разработаны технические требования, приведены технические характеристики, и разработаны методы применения КЭК для испытаний.

1. Обзор методов анализа эффективности экранирования и устройств для испытаний на электромагнитную совместимость

В данном разделе представлен обзор анализа ЭЭ пластиной и корпусом с апертурой, а также устройств на основе линий передачи, предназначенных для испытаний на ЭМС.

1.1 Актуальность экранирования и испытаний в области электромагнитной совместимости

Обеспечение устойчивой работы РЭА в условиях воздействия электромагнитных помех актуально в связи с интеграцией компонентов и ростом плотности монтажа ПП. Использование полупроводниковых компонентов и ИС снижает массу и габариты РЭА, но увеличивает восприимчивость к ЭМП. Кроме того, тенденция повышения быстродействия цифровых схем и рабочих частот аналоговых схем предъявляют всё более жёсткие требования к ЭМС РЭА [1].

Экранирование широко используется как конструкторское средство обеспечения ЭМС, защищающее рецептор от источника поля в пределах определённого пространства. Разработка новых методов оценки и устройств для экранирования РЭА – задача, которая остаётся актуальной и решается в настоящее время производителями РЭА разных стран. Практика показывает, что геометрические размеры корпуса РЭА выбираются разработчиком с учетом внутреннего расположения компонентов, узлов, модулей и т.д., а его толщина – с учетом механических воздействий или распределения теплового поля по поверхности экрана (при использовании радиатора в качестве экрана). Данный подход некорректен с точки зрения экранирования при оптимизации устройства и требует вычисления ЭЭ и применения дополнительных мер по её повышению. На стадии эскизного проектирования из-за сложности вычисления ЭЭ разработчиками не всегда своевременно принимаются меры для обеспечения ЭМС устройства в целом, что в значительной мере увеличивает стоимость его разработки на конечном этапе проектирования. В бортовой РЭА космического аппарата (КА) в качестве экранов используют закрытые проводящие конструкции, представляющие собой корпуса и блоки [2]. Уменьшение массы бортовой РЭА КА является весьма важной задачей, поскольку выведение КА на орбиту достаточно дорого. Поэтому, в качестве экранов широко используют композитные материалы, которые имеют значительно меньшую массу, чем металлические. Однако, радиочастотные свойства подобных материалов мало исследованы, а их применение эффективно в диапазоне частот от 200 МГц до 40 ГГц, в котором ЭЭ составляет не менее 30 дБ [3]. Поэтому для экранирования на более низких частотах чаще используют конструкции из металла. На данный момент от 13% до 18% веса всего КА приходится на экранирующие конструкции, что требует уменьшения плотности металла и толщины экрана. Таким образом,

задача экранирования бортовой РЭА остается одной из самых актуальных. Поэтому важен анализ ЭЭ разных форм конструкций экранов и материалов в диапазоне параметров бортовой РЭА КА, позволяющий до изготовления и проведения натурных испытаний сделать предварительные оценки их эффективности.

Надежное функционирование радиоэлектронных блоков КА обеспечивается комплексом пройденных испытаний, одними из которых являются испытания на ЭМС, в частности на воздействие ЭМП на КА в безэховой камере. Эти испытания трудоемкие и дорогостоящие, поэтому на первоначальных этапах проектирования проводят многочисленные расчеты и предварительные испытания. При помощи ТЕМ-камер можно проводить измерение помехоэмиссий и помехоустойчивости испытуемых объектов (ИО), с целью предотвращения сбоев и сохранения всех заданных эксплуатационных характеристик.

Введение требований по стойкости изделия к воздействию СВЧ и сверхширокополосного электромагнитного излучения [4–6] еще более усложняет задачу воспроизведения внешнего воздействия во всем диапазоне заданных частот и амплитудных параметров. Совершенствование электромагнитных испытаний является актуальной задачей, которая требует воспроизведения реальных внешних воздействующих факторов на РЭС, что позволит определить наиболее опасные воздействия и осуществить оценку электромагнитной стойкости по результатам испытаний на имитаторах, параметры которых отличаются от требований нормативных документов [7]. Практика измерений показала, что источники помехоэмиссии могут быть отнесены к создающим узкополосные и широкополосные помехи. К первым относят гармоники сигналов, вторые могут быть обусловлены, например, процессами переключения в цифровой аппаратуре [8]. Совершенствование испытаний, проводимых на ЭМС, приближая испытания оборудования к более реальным условиям эксплуатации, при которых каждый работающий блок или узел изделия создаёт вокруг себя не только электромагнитное, но и тепловое поле, может влиять на работу как отдельных частей, так и системы в целом. Поэтому важно проводить одновременное испытание РЭС на воздействие электромагнитного и температурного полей.

Таким образом, испытания следует проводить при условиях, близких к реальным условиям эксплуатации устройства, одновременно воздействуя на ИО электромагнитным и температурным полями с контролируемой влажностью воздуха. На данный момент подобные испытания не проводятся, из-за отсутствия соответствующих устройств. Однако, они необходимы поскольку приближают работу ИО к реальным условиям эксплуатации, применяя, нестандартный относительно нормативных документов, подход.

Также, в связи с возрастающей распространённостью электромагнитных излучений, характеризующихся широтой спектра и уровнем воздействия на биологические объекты (БО), а также недостаточностью данных об эффектах, вызываемых влиянием именно сверхкороткого импульса (СКИ), необходимо проводить исследования, направленные на выявление возможных специфических ответных реакций БО на данный тип излучения. Возможность использования для подобных целей устройства, в котором поддерживаются заданные значения температуры и напряженности поля, позволит обеспечить необходимый контроль средовых показателей (температуры и влажности), отслеживание которых является одним из критических факторов чистоты проведения эксперимента и получения достоверных результатов исследований. Существующие на данный момент конструкции устройств для испытания не позволяют осуществлять подобные воздействия на БО, а также видеонаблюдение влияния указанных факторов на объект, не извлекая его из под воздействия ЭМП, а соответственно из камеры, внутри которой происходит воздействие. Между тем, такая возможность даст новое качество в оценке результатов воздействия. Изучение воздействия ЭМП на БО является перспективным, поскольку влияние ЭМП на БО по-прежнему остается неоднозначным [9]. Устройств, позволяющих проводить совместные климатические и электромагнитные исследования по воздействию ЭМП на БО в широком диапазоне температур, влажности, амплитуд, частот и визуальный контроль за БО, не извлекая его, в литературе не упоминается. Однако, использование системы одновременного климатического и электромагнитного воздействия с повышенным экранированием и заданной термостабилизацией позволит обеспечить контролируемые воздействия на БО, что повысит точность и воспроизводимость результатов, а использование в режиме реального времени визуального контроля даст возможность оценки длительного непрерывного воздействия при продолжительном поддержании жизнедеятельности БО.

1.2 Методы анализа эффективности экранирования

1.2.1 Экранирование прямоугольным корпусом с апертурой

Экранирование бортовой РЭА наиболее важно, так как КА при эксплуатации подвергается разнообразным, как внешним, так и внутренним, электромагнитным облучениям, что в связи с ростом частот и жесткости электромагнитной обстановки КА делает задачу экранирования одной из наиболее актуальных. Одним из видов экранирования бортовой РЭА является экранирование корпусом. Разнообразные прямоугольные металлические конструкции корпуса имеют в стенках отверстия, при этом внутри него размещаются объекты (ПП, металлическая пластина или некоторый выступ в стенке корпуса) или элементы защиты от

внешнего поля (металлический корпус местного экранирования). Произведен патентный поиск подобных устройств, а также методов экранирования корпусом.

Для экранирования отдельного узла или части ПП применяют местное экранирование корпусом или пластиной, при этом экран может являться одновременно теплоотводом для радиоэлектронного компонента. Также применяются теплоотводные радиаторы с вентилятором [10, 11] в качестве электромагнитных экранов. Конструктивно корпуса выполняются из одной или двух симметричных [12] и несимметричных [13] частей, сочленяющихся клипсами, защёлками или вставкой в паз, дополнительно экранирующими щели от ЭМП. При жестком креплении корпуса экрана, одна из частей жестко (при помощи пайки) крепится непосредственно к ПП, при этом крышка сочленяется с жестким основанием, образуя закрытый экран без щелей, тем самым, увеличивая ЭЭ корпусом [14]. Возможно выполнение корпуса как единого устройства, с пружинными прокладками со стороны крепления основания [15]. Отверстия под соединитель экранируются дополнительными плоскими жесткими прокладками, между экраном и соединителем [16]. Возможно экранирование всех элементов ПП фольгой с диэлектриком на внутреннем слое [17].

Шасси и корпус применяются для целостности системы, а также могут служить теплоотводом для модулей, блоков или компонентов РЭА, в качестве активных или пассивных систем охлаждения [18, 19]. Конструктивно шасси и корпуса выполнены прессовкой, литьём, вырезным способом, из нескольких соединяющихся частей (пластин, блоков, модулей или сот). Для повышения ЭЭ корпуса, соединение частей между двумя примыкающими частями происходит внахлест [20], посредством пазов [21], зажимных пружин или клипс [22]. При модульном исполнении системы акцентируется внимание на экранировании щелей и межмодульных перегородок экранирующими пластинами, прокладками, вставками, пружинами или зажимными клипсами. Крепление всех соединяющихся частей происходит жёстко при помощи винтов или клёпок, либо посредством защёлкивающихся клипс. Отверстия в корпусах для соединителей или волноводов [23] экранируются дополнительно экранирующими пластинами, прокладками, вставками [18]. При этом в корпусах могут располагаться соединительные отверстия для непрерывающегося заземления соединителя во время разъединения штепселя кабеля [24]. Вентиляционные отверстия экранируются клеткой Фарадея [25] или сеткой из круглых отверстий [26]. Крышки корпуса выполняются с пазами, зубчатыми или волнистыми прокладками [27]. Таким образом, корпуса и шасси должны изготавливаться индивидуально под конкретную систему или комплекс с учётом всех предъявляемых к ним требованиям по ЭМС.

Соединительные вилки и розетки экранируются корпусами, кожухами или пластинами из электропроводящего материала. Конструкция корпуса состоит из одной или нескольких сочленяющихся частей. Соединитель, расположенный на ПП [28] или корпусе (шасси) экрана, экранируется дополнительными жесткими прокладками, пластинками или вставками. Большое внимание уделяется конструкции соединительных вилок [29, 30], а именно экранированию щели, возникающей между кабелем и соединителем. Данная щель экранируется цельным кожухом [31] или кожухом в виде лепестков, с крепежным хомутом на конце [32]. Электрический соединитель с гальванической развязкой и экранированием от ЭМП и электростатического разряда (ЭСР) включает в себя диэлектрический корпус и экранированные вставки и корпуса [33]. Электрический соединитель для межплатных соединений имеет корпус, накладывающийся поверх соединительной вилки или розетки [34].

Экран кабеля выполнен с помощью клетки Фарадея из ферросплава с высокой магнитной проницаемостью, а состав связующих проводящих эластомеров обеспечивает экранирование от ЭМП [35]. Для защиты жгута кабелей в авиации предложена трубчатая экранирующая втулка, включающая подложку и слой из электропроводящего материала, который крепится к внутренней поверхности подложки [36].

Таким образом, при экранировании соединителей критично экранирование щелей, возникающих в месте стыка корпуса и кабеля и влияющих на ЭЭ корпуса и кабеля в целом. Материал и габариты, используемые для экранирования соединителя и кабеля, в конечном итоге определяют массу устройства в целом.

В методы и устройства, используемые при изготовлении экранированных прокладок, входят новшества, связанные с материалом, поперечным сечением, формой и многоуровневой структурой прокладки. Дополнительные свойства прокладок, такие как клейкость, защита от вскрытия и защита от адгезии, придают им универсальность. Конструктивно прокладки представляют собой электропроводящий отрезок конечной длины с отверстием (пазом) для крепления [37], либо ленточно-протяженную плоскую [38] или волнообразную конструкцию [39]. Многоуровневая структура прокладки повышает ЭЭ и обеспечивает упругость к переменным деформациям [40], что повышает их цикл работоспособности, а также защищает от адгезии [41]. Для подобных целей предложены зубчатые [42] и пружинные прокладки [43, 44], как правило, изготовленные из жесткого проводящего материала без внешнего покрытия, для контакта между двумя соприкасающимися экранирующими поверхностями. При изготовлении многоуровневых прокладок используют мягкие электропроводящие материалы и полимеры, либо полимеры, покрытые сеточной структурой [45] из электропроводящего мягкого материала. Интерес представляют легкие прокладки, выполненные из электропроводящего

полимера или материала с повышенной стойкостью к постоянным деформациям и высокой ЭЭ, например, прокладки для экранирования межмодульных щелей в электронных модулях [46, 47].

Материал, применяемый при изготовлении корпуса (пластины) экрана влияет на массу и ЭЭ конструкцией. Изготовление корпуса из легких сплавов и нанесение на его поверхность специальных экранирующих покрытий (ферромагнитный аморфный сплав [48]; композит, содержащий полифениленый эфир со смесью смолы стирола [49]; фоторезистивный материал [50]; теплопроводящий слой [51]) экранирует от ЭМП и облегчает конструкцию в целом, а также придает корпусу дополнительные свойства электро- и теплопроводимости. Предложена пластина с высокой ЭЭ от ЭМП, изготовленная из термопластичного полимера с слоем частиц проводящего металла [52]. Экранирование от ЭМП и снятие электростатического заряда обеспечивают материалы из многослойной волокнистой структуры [53]. Предложены экраны из полимерных композитов, включающие полимер с высокой диэлектрической проницаемостью [54], слоённая углеродная структура с металлическими нитями для экранирования кабеля [55]. Рассмотрены методы и способы для получения непрерывного металлизированного термоформуемого материала, который имеет один или более проводящих слоёв [56].

Таким образом, основными требованиями, предъявляемыми к данным видам конструкций, являются габариты, малая масса и ЭЭ корпусом. Большинство из предъявляемых требований зависят от двух показателей: выбранного материала и конструкции экрана. Специфичность некоторых из представленных экранов говорит о конкретном месте их применения. Поэтому для каждого конкретного устройства должен быть выполнен собственный анализ ЭЭ корпусом, для пригодности его в конкретном устройстве и принятия дополнительного взвешенного решения (например размещения отверстия под соединитель) по повышению ЭЭ.

Анализ ЭЭ выполняют разными способами и методами. Например, для вычисления напряжённости электрического поля в отсеке полезной нагрузки ракеты-носителя применяют метод баланса энергий [57]. Простота использования данного метода основывается на теореме Пойтинга и на статистическом свойстве электрически связанных резонаторов, возбуждаемых высокочастотным источником. Представленный метод является наиболее эффективным с точки зрения временных затрат и вычисления верхней граничной частоты по сравнению с численными методами [58], а также методом моментов [59]. Однако, последние вычисления более точны и используются при электродинамическом моделировании, которое требует значительных вычислительных ресурсов.

Предложен быстрый метод вычисления, основанный на функции Грина и на представлении Эвальда, а также методе интерполяции. Так, классическое вычисление ЭЭ

корпусом (при падении плоской однородной волны на пустой корпус с отверстием) может быть трудоёмким, т.к. поле внутри экрана может исказиться из-за присутствия двухмерной или трехмерной проводящей структуры, особенно на частоте резонанса корпуса щели [60].

Представлен метод для вычисления ЭЭ, с тонкими щелями, основанный на конечно-разностном методе анализа во временной области [61]. Показано, что данный метод позволяет вычислить ЭЭ при воздействии мощных электромагнитных импульсов.

Предложен схемный подход по оценке ЭЭ прямоугольного корпуса с группой апертур в любой из стенок корпуса [62]. Полученная модель может работать на частотах свыше 1 ГГц, в том числе на модах высоких порядков. В предложенной модели при вычислении ЭЭ апертуры могут располагаться одновременно в нескольких стенках корпуса.

Анализ наличия критичных частот и частотных диапазонов произведен в [63] для экранирующих оболочек РЭА, на которых корпуса имеют пониженную ЭЭ в СВЧ-диапазоне при волновом режиме. На основании анализа результатов исследований, авторами обоснован вывод о существовании резонансных явлений в экранирующих оболочках, в том числе при наличии апертур, а также сделаны численные оценки ЭЭ при данном условии. Приводится обобщенная классификация частотных областей экранирования, учитывающая резонансные явления оболочек РЭА с апертурами. Формулы для поля, возбуждённого в идеально проводящем прямоугольном корпусе с электрически малой и большой апертурами, смещенными относительно центра стенки, получены в [64, 65] соответственно.

Техническое решение по повышению ЭЭ металлических корпусов РЭА на резонансных частотах предложено в [66]. Приведены результаты численных экспериментов по применению данного решения для снижения электромагнитных помех в межсоединениях ПП внутри корпуса при воздействии внешних сверхширокополосных электромагнитных импульсов и ЭСР. Приведен алгоритм и результат численной оценки распределения характеристик ЭМП во внутренних точках корпуса при наличии и отсутствии покрытия радиопоглощающим материалом (РПМ) на его внутренних стенках [67].

Известна аналитическая модель для простой прямоугольной структуры с щелью в центре при падении на неё плоской электромагнитной волны (ЭМВ) (рисунок 1.1а) и эквивалентная схема на основе короткозамкнутой линии передачи (рисунок 1.1б) [68]. Эта модель была расширена для одного и нескольких круглых отверстий, расположенных в центре стенки корпуса [69]. На основе этих моделей получена универсальная аналитическая модель корпуса с проводящей структурой или ПП внутри [70]. С помощью данной модели ЭЭ может быть вычислена как функция, зависящая от частоты, размера корпуса и щели. Аналитическая модель

сравнивалась с результатами измерения при помощи логопериодических антенн и результатами моделирования методом TLM и показала свою корректность. Также, на основе аналитической модели [68, 69], получены комбинированные модели для корпуса с нецентральной расположением апертуры в стенке [71] и перфорированной стенкой [72]. Результаты вычисления ЭЭ, полученные с помощью комбинированной модели, сравнивались с измерениями, полученными при помощи логопериодической антенны в полубезэховой камере, а также с результатами [73], полученными с помощью метода конечных разностей (МКР) и методом конечных элементов (МКЭ) во временной области, и моделирования в программе CST MWS [74].

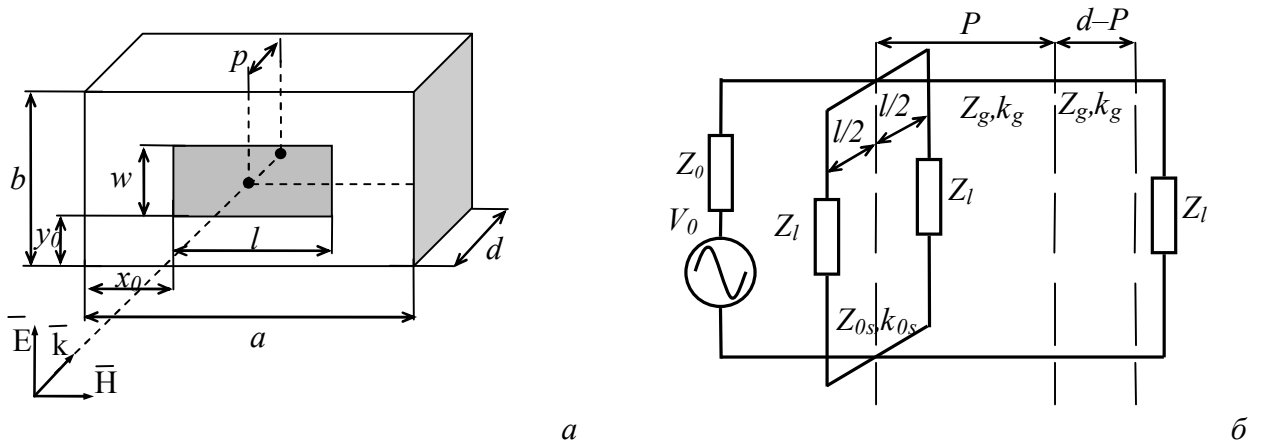


Рисунок 1.1 – Геометрическая модель (а) и эквивалентная схема (б) корпуса с щелью

Аналитические выражения для вычисления ЭЭ корпусом с апертурой в центре [68–70] и различном её расположении [71, 72] в стенке корпуса представлены ниже. Эквивалентная схема апертуры корпуса представлена копланарной линией. В точке наблюдения p ЭЭ может быть найдена относительно волнового сопротивления свободного пространства и характеристического импеданса апертуры, полученных [75] для эффективной ширины щели корпуса [68].

Характеристическое сопротивление линии

$$Z_{0S} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \cdot \frac{1 + \sqrt[4]{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1}, \quad (1.1)$$

где эффективная ширина щели

$$w_e = w - \frac{5 \cdot t}{4 \cdot \pi} \cdot [1 + \ln(4 \cdot \pi \cdot w/t)], \quad (1.2)$$

где t – толщина стенки корпуса. Результаты достоверны при условии $w_e < b/\sqrt{2}$.

Из модели [68] характеристическое сопротивление апертуры в центре определяется как

$$Z_{ap} = j \cdot l \cdot Z_{0S} \cdot \operatorname{tg}(k_0 \cdot l/2)/(2 \cdot a), \quad (1.3)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, для волны в свободном пространстве.

Из модели [71] сопротивление для различного расположения апертуры определяется как

$$Z_{ap} = \frac{C_{ma} \cdot Z_{0S}}{2} \cdot \frac{Z_l + j \cdot Z_{0S} \cdot \operatorname{tg}(k_0/2)}{Z_{0S} + j \cdot Z_l \cdot \operatorname{tg}(k_0/2)}, \quad (1.4)$$

где $Z_l = (1 + j) \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\sigma}}$ – сопротивление источника в апертуре; C_{ma} – коэффициент для учета мод более высоких порядков и связи апертуры при её различном положении в стенке корпуса

$$C_{ma} = \frac{\int_{x_0}^{x_0+l} \int_{y_0}^{y_0+w} \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot (y - y_0)}{w}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot (x - x_0)}{l}\right) dx dy}{X \cdot Y}. \quad (1.5)$$

Напряжение и сопротивление источника в апертуре определяются как

$$v_1 = \frac{v_0 \cdot Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}}, \quad (1.6)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0 \cdot Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}}. \quad (1.7)$$

Волновое сопротивление в режиме волны TE_{10} в волноводе определяется как

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2 \cdot a)^2}. \quad (1.8)$$

Напряжение и сопротивление источника в месте наблюдения (точка p) определяются как

$$v_2 = \frac{v_1}{\cos(k_g \cdot p) + j \cdot (Z_1/Z_g) \cdot \sin(k_g \cdot p)}, \quad (1.9)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + j \cdot Z_g \cdot \operatorname{tg}(k_g \cdot p)}{1 + j \cdot (Z_1/Z_g) + \operatorname{tg}(k_g \cdot p)}. \quad (1.10)$$

При этом волновое число для волны, распространяющейся в волноводе, определяется как

$$k_g = k_0 \cdot \sqrt{1 - (\lambda/2 \cdot a)^2}. \quad (1.11)$$

Сопротивление нагрузки в точке p определяется как

$$Z_3 = j \cdot Z_g \cdot \operatorname{tg}(k_g \cdot (d - p)), \quad (1.12)$$

а при её смещении относительно центра согласно модели из [72] – как

$$Z_3 = Z_g \cdot \frac{Z_l + j \cdot Z_g \cdot \operatorname{tg}(k_g \cdot (d - p))}{Z_g + j \cdot (Z_l) + \operatorname{tg}(k_g \cdot (d - p))}. \quad (1.13)$$

Напряжение и ток в точке p определяются как

$$v_p = \frac{v_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}, \quad (1.14)$$

$$i_p = \frac{v_2}{Z_2 + Z_3}. \quad (1.15)$$

При расположении внутри корпуса металлической пластины аналитические выражения (1.9), (1.10), (1.13) могут быть заменены выражениями для v_2 , Z_2 и Z_3 из модели [70] и подставлены в (1.15). При этом вышеописанная модель для корпуса с центральным расположением апертуры сохраняется.

В точке наблюдения p ЭЭ (дБ) определяется как

$$\text{ЭЭ} = -20 \cdot \lg \left| (2 \cdot v_p) / v_0 \right|. \quad (1.16)$$

где $v_0 = 1$ В, амплитуда воздействия.

Таким образом, при помощи вышеописанных моделей может быть вычислена ЭЭ корпусом при ортогональном падении плоской электромагнитной волны на стенку с центральным или смещенным расположением апертуры.

1.2.2 Экранирование пластиной

Модель, представленная в европейском авиакосмическом стандарте ECSS-E-HB-20-07A [2], описывает вычисление ЭЭ материалов для КА. Модель, основанная на теории линий передачи и изменении волнового сопротивления на границах сред, описывает физические процессы отражения, поглощения и передачи плоской ЭМВ для однородных изотропных сред [76]. Представлена уточненная модель [77], исходя из уравнений Максвелла для плоского однородного металлического экрана (считающегося линейной системой с протяженностью, достаточной для исключения влияния краевого эффекта) при ортогональном падении на него ЭМВ, распространяющейся вдоль оси y (рисунок 1.2). При помощи данных моделей и их усовершенствований проводят различные расчеты ЭЭ материалов [78]. Так, например, представлены аналитическая модель и методики измерения ЭЭ неоднородных материалов [79], а также методика расчета ЭЭ пластины с отверстием, изготовленной из разных материалов (медь, алюминий, нержавеющая сталь и никель) [80]. Аналитическая модель подтверждается сравнением результатов моделирования в программе HFSS [81] и измерений.

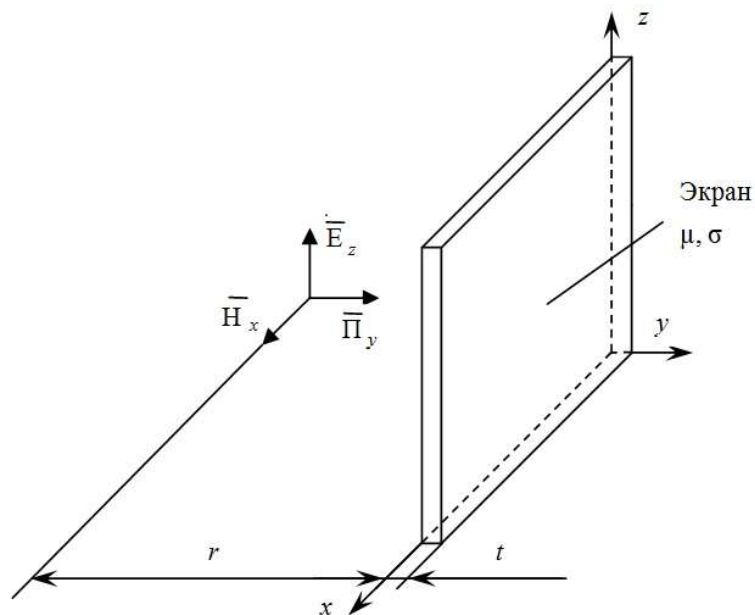


Рисунок 1.2 – Анализируемая модель плоского однородного металлического экрана

Согласно модели [77], источник помех характеризуется длиной волны излучения (λ , м) и расстоянием от источника до экрана (r , м). В ближней зоне, где $r < \lambda/2\pi$, поле еще не сформировалось в плоскую ЭМВ и представляет собой либо электрическое (высокоомное), либо магнитное (низкоомное) поле, в зависимости от электрических характеристик источника помех. В дальней зоне, где $r > \lambda/\pi$, поле формируется в плоскую ЭМВ. Экран характеризуется его толщиной (t , м), удельной электрической проводимостью (σ , См/м) и относительной магнитной проницаемостью (μ_r). Количественной характеристикой экранирования является ЭЭ. Анализ ЭЭ может быть выполнен исходя из теории линий передачи или теории поля. Основным принципом действия экрана является то, что при воздействии поля источника на поверхности экрана индуцируются заряды, а в его толще – токи и магнитная поляризация. Они создают вторичное поле. При сложении вторичного и первичного полей образуется результирующее поле, которое в защищаемой области пространства оказывается слабее первичного [82]. Таким образом, определяется ЭЭ как отношение значений напряженности поля в точке наблюдения при отсутствии (E_0 и H_0) и присутствии (E_1 и H_1) экрана [76]:

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{E_0}{E_1} \right|, \quad (1.17)$$

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{H_0}{H_1} \right|. \quad (1.18)$$

При прохождении ЭМВ от первичного источника через среду, её амплитуда экспоненциально затухает, что происходит за счет поглощения, вызванного тепловыми потерями от возбуждаемых вихревых токов в металле и выражается как

$$A_{\partial B} = 20 \cdot \left(\frac{t}{\delta} \right) \lg(e) = 8,686 \cdot t \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}, \quad (1.19)$$

где $\delta = \sqrt{2/\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$ – глубина скин слоя, $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $f = c/\lambda$ – частота источника.

Затухание за счет отражения электромагнитной энергии от границ раздела диэлектрик–экран и экран–диэлектрик для основной волны при воздействии поля в дальней зоне определяется как

$$R_{\partial B}^T = 20 \cdot \lg \left[\frac{(|Z_0| + |Z_m|)^2}{4 \cdot |Z_0| \cdot |Z_m|} \right], \quad (1.20)$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ – характеристическое сопротивление воздуха плоской ЭМВ, $Z_m = \sqrt{\frac{j \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma}}$ – характеристическое сопротивление металла плоской ЭМВ.

При анализе ЭЭ магнитного (низкоомного) и электрического (высокоомного) полей в ближней зоне на расстоянии $r < \lambda/2\pi$ до экрана, изменяются характеристические сопротивления диэлектрика, что позволяет рассматривать электромагнитные явления в ближней зоне как квазистационарные.

Для электрического поля в ближней зоне источник создает безвихревое (потенциальное) электрическое поле. При этом характеристическое сопротивление воздушного диэлектрика источнику поля определяется как

$$Z_D^E = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot r}. \quad (1.21)$$

Для магнитного поля в ближней зоне из условий квазистационарности можно считать, что магнитное поле является безвихревым. Характеристическое сопротивление воздушного диэлектрика магнитному полю определяется как

$$Z_D^H = -j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot r. \quad (1.22)$$

Таким образом, уравнения затухания за счет отражения от границ раздела диэлектрик–экран и экран–диэлектрик для электрического и магнитного полей определяются как

$$R_{\partial B}^E = 20 \cdot \lg \left[\frac{(|Z_D^E| + |Z_m|)^2}{4 \cdot |Z_D^E| \cdot |Z_m|} \right], \quad (1.23)$$

$$R_{\partial B}^H = 20 \cdot \lg \left[\frac{\left(|Z_{\partial}^H| + |Z_m| \right)^2}{4 \cdot |Z_{\partial}^H| \cdot |Z_m|} \right]. \quad (1.24)$$

Затухание электромагнитной энергии за счет многократных внутренних затухающих переотражений в стенке экрана для остальных составляющих волн определяется как

$$B_{\partial B} = 20 \cdot \lg \left[1 - \left(\frac{|Z| - |Z_m|}{|Z| + |Z_m|} \right)^2 \cdot e^{-2 \cdot \frac{t}{\delta}} \right], \quad (1.25)$$

где Z – характеристическое сопротивление воздушного диэлектрика, соответствующее расположению источника в ближней ($Z_{\partial}^H, Z_{\partial}^E$) или дальней (Z_0) зоне.

Для плоского однородного экрана ЭЭ определяется как

$$\text{ЭЭ}_{\partial B} = A_{\partial B} + R_{\partial B} + B_{\partial B}. \quad (1.26)$$

Таким образом, по аналитической модели может быть вычислена ЭЭ экрана независимо от расположения источника внутри или вне экрана. При необходимости возможно поменять местами источник и рецептор ЭМП. Общая модель вычисления ЭЭ, согласно [2, 77, 83], может быть представлена в виде, показанном на рисунке 1.3.

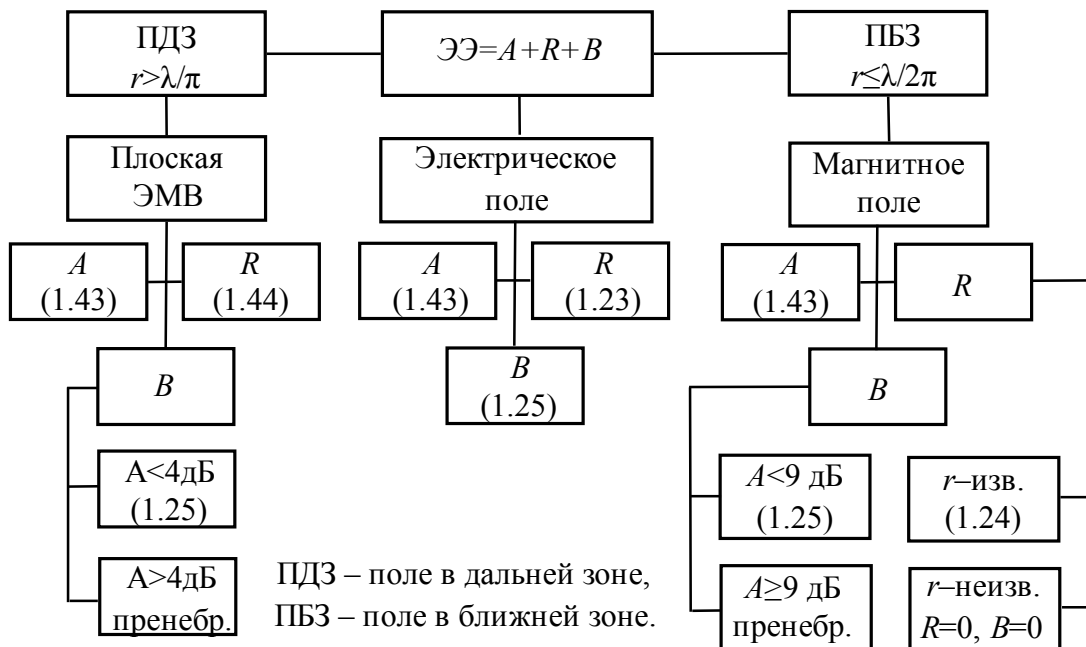


Рисунок 1.3 – Модель вычисления ЭЭ для бесконечно протяженного плоского однородного металлического экрана

1.2.3 Электродинамическое моделирование

Освоение электродинамического анализа делает возможным моделирование структур, квазистатический анализ которых даёт неточные результаты или вовсе невозможен. В работе [84] программно реализована модель, основанная на анализе проводных структур методом моментов при ступенчатых функциях в качестве базисных и дельта-функциях в качестве тестовых. Разработана программа для электродинамического анализа излучающих проводных структур произвольной трёхмерной формы с произвольным расположением и фиксированным размером источника. Программа позволяет произвести удобное задание и отображение структуры, а также получение вычисленных характеристик структуры в текстовом и графическом видах. Результаты тестирования программы показали удовлетворительное совпадение с опубликованными данными вычислений и измерений на трёх примерах вычисления распределения тока вдоль полуволнового и волнового диполей, а также входного адмитанса диполя в диапазоне частот. Ряд работ академика А.Н. Тихонова по методам решения некорректных задач [85] позволил разработать эффективные модели численного электродинамического анализа различных структур [86], в т.ч. произвольных трёхмерных [87], успешно используемых в системе электродинамического моделирования ANSYS [81].

Электродинамическое моделирование для бортовой РЭА КА используется на самых разных уровнях: от материалов до КА в целом. Так, например в миссии магниторазведки программы NASA/JPL JUNO выполнено моделирование для каждого уровня КА (рисунок 1.4), в том числе материалов, а также научно-исследовательских приборов, входящих в её состав [88]. В работе [89] приведена методология виртуальных испытаний на ЭМС летательного аппарата при помощи программы CST STUDIO SUITE и последующая обработка полученных данных.

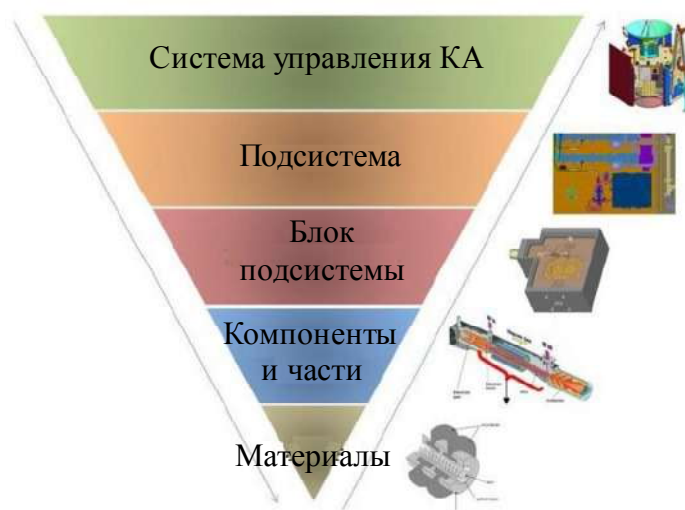


Рисунок 1.4 – Моделирование и анализ КА при реализации в миссии JUNO NASA [88]

В самом общем случае электромагнитный и волновой (возникающий из-за нарушения условий квазистационарности при прохождении ЭМП через экран) режимы описываются уравнениями Максвелла. Поэтому строгое решение задачи вычислительного моделирования экранирующих корпусов требует их численного решения для граничных условий, определяемых геометрической формой реальной конструкции экрана, при начальных заданных условиях распространения ЭМП. Проводить упрощения конструкции экрана неправомерно. Однако необходимые вычислительные затраты оказываются крайне высокими даже для относительно простых конфигураций. Поэтому такой анализ, называемый электродинамическим или полноволновым (поскольку он учитывает все типы волн, токи смещения, т.е. волновые процессы, процессы перехода из электромагнитного режима в волновой режим, а также условия ближней и дальней зоны), используется при анализе сложных геометрических форм экранирующих конструкций, как правило, только на частотах в десятки и сотни гигагерц. Несмотря на сложность этого анализа, он важен.

1.2.4 Измерение эффективности экранирования

Стандарты в области ЭМС задают требуемые уровни излучаемых эмиссий и восприимчивости к ЭМП. Они могут быть обеспечены выбором формы, материала и конструкции экрана. В основном стандартами устанавливаются порядок и методы измерения, с различными максимально допустимыми уровнями и пределами. Кроме максимально допустимых уровней, например, в военных и гражданских стандартах различаются методика проведения испытаний и используемое оборудование (например, пиковый детектор используется в военных стандартах, а квази- или среднепиковый детекторы – в гражданских). Также различия имеются и в диапазоне частот (например измерения излучаемого электрического поля для военных стандартов начинаются от 10 кГц, а для гражданских – от 30 МГц) [90].

Одним из наиболее часто используемых стандартов, определяющих требования к экранам, является стандарт MIL-STD 285 [91]. Он охватывает диапазон частот от 100 кГц до 10 ГГц, различные компоненты ЭМП, а также устройства для измерения ЭЭ. В стандарте описываются источники воздействия и их размещение при измерении ЭЭ. Воздействие может быть непрерывное, модулируемое или импульсное. В зависимости от типа измерения различают следующие требования:

1. Низкоимпедансные магнитные поля. В качестве передающей и приемной антенн должна быть использована петлевая антенна диаметром 12", расположенная в 12" от стенки экрана. Диапазон частот от 150 до 200 кГц. ЭЭ корпусом должна быть не менее 70 дБ.

2. Высокоимпедансные электрические поля. В качестве передающей и приемной антенн используются штыревые монополи длиной 41", расположенные в 12" от стенки экрана. Частоты, на которых производятся измерения: 200 кГц, 1 МГц и 18 МГц. ЭЭ корпусом на этих частотах должна быть не менее 100 дБ.

3. ЭМП дальней зоны. В качестве передающей и приемной антенн используются диполи, настроенные на частоту 400 МГц, которые помещают на 72,2" от стенки корпуса экрана. Испытания должны быть выполнены на частоте 400 МГц. ЭЭ корпусом должна быть не менее 100 дБ.

Стандарт IEEE Std-299 [92] аналогичен вышеописанному стандарту и описывает методику измерения ЭЭ корпуса в диапазоне частот от 9 кГц до 18 ГГц (с возможностью расширения до 50 ГГц и 100 ГГц). Минимальные геометрические размеры корпуса не менее 2 м, что связано с размерами антенн, размещаемых внутри корпуса, чтобы измерить ЭЭ при воздействии ЭМВ в диапазоне частот от 30 до 50 МГц. Частоты разделены на три диапазона: низкочастотный диапазон от 9 кГц (50 Гц) до 20 МГц для магнитной составляющей ЭМП, измеряемой при помощи петлевой антенны диаметром 0,3 м (рисунок 1.5а); диапазон от 20 МГц до 300 МГц для электрической составляющей поля, измеряемой по мощности; диапазон от 300 МГц до 18 ГГц (100 ГГц) для электрической составляющей, измеряемой по мощности (рисунок 1.5б).

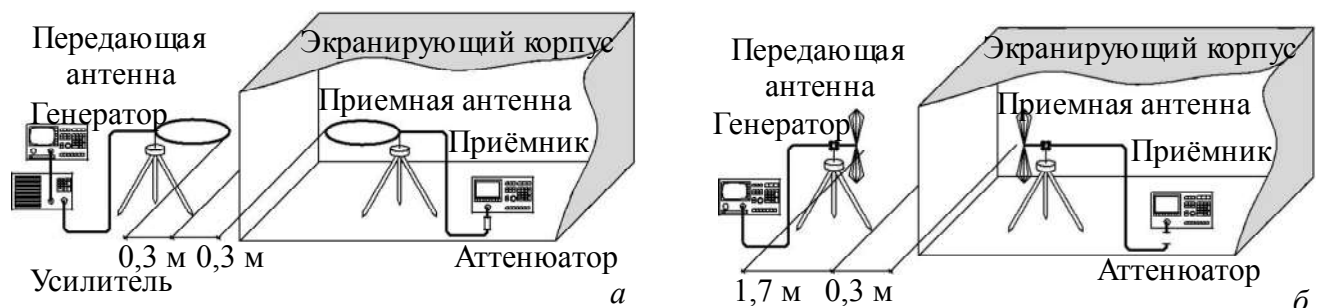


Рисунок 1.5 – Измерительная установка для измерения ЭЭ корпусом согласно стандарту IEEE Std-299, для диапазонов низких (а) и высоких (б) частот

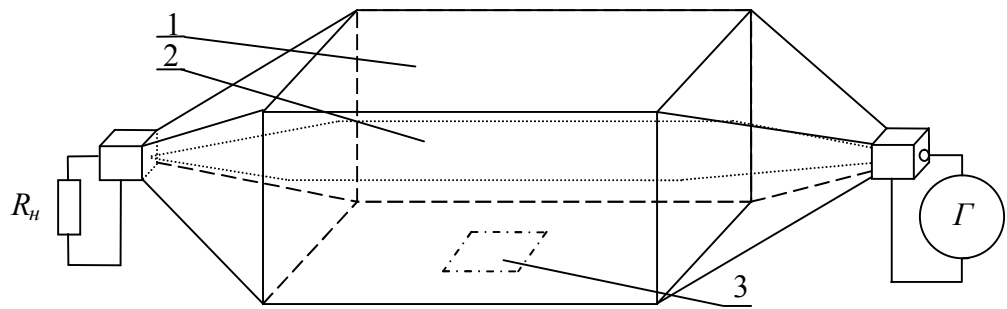
Военный стандарт MIL-STD 461F [93], используемый НАТО, является одним из основополагающих стандартов в области ЭМС и устанавливает требования к конструкции по уровню чувствительности к воздействующим и излучаемым ЭМП. Эти требования определяют необходимое оборудование и уровни для измерения: излучения магнитного поля в диапазоне частот от 30 Гц до 100 кГц (RE101); излучения электрического поля в диапазоне частот от 10 кГц до 18 ГГц (RE102); паразитных излучений и гармоник антенн в диапазоне от 10 кГц до 40 ГГц (RE103); восприимчивости к магнитному полю в диапазоне частот от 30 Гц до 100 кГц (RS101); восприимчивости к электрическому полю в диапазоне частот от 2 МГц до 40 ГГц

(RS103); восприимчивости к импульсному ЭМП (RS105). Испытание согласно требованиям RS105 включает измерение с расположением ИО внутри ТЕМ-камеры.

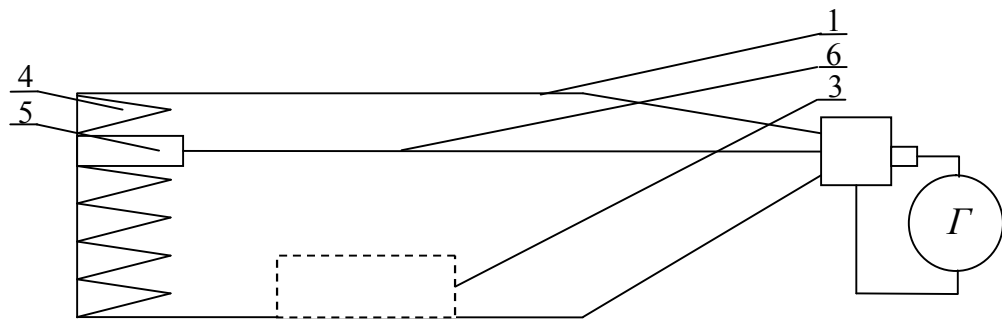
1.3 Устройства для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную совместимость

Испытания оборудования на ЭМС, проводимые на открытом пространстве (Open Area Test Site – OATS) являются образцовыми для большинства стандартов по ЭМС, которые предполагают оценку поля в дальней зоне. Как правило, подобные стандарты применяются при испытании оборудования на помехоэмиссии и помехоустойчивость к облучению ЭМП [94]. OATS-испытания могут быть трудоемки и некорректны за счет влияния неконтролируемых внешних полей и климатических условий окружающей среды на ИО. Альтернативой проведения испытаний является закрытое пространство с бесконечной землей и равномерным распространением поля вдоль поверхности проводника с полным его поглощением в конце проводника. Для данных целей существуют разработанные полубезэховые, безэховые, ТЕМ (Transverse Electromagnetic Mode)- и GTEM (Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode)-камеры. В основном, подобные испытания зависят от корректности и точности измерений используемого оборудования, а также параметров и характеристик используемой камеры.

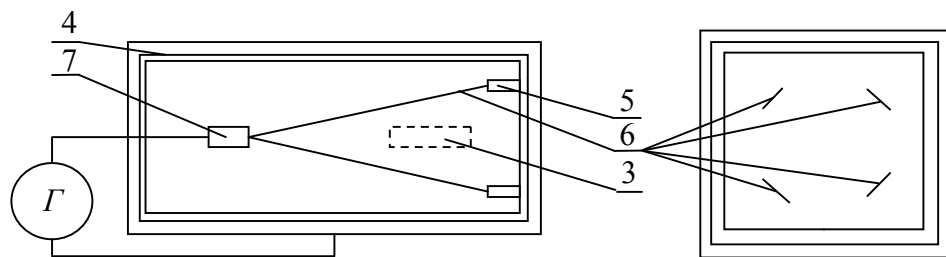
Первая ТЕМ-камера (рисунок 1.6а) [95] была разработана в 1974 г. для имитации распространения Т-волны в открытом пространстве. Существует множество конструкций её исполнения (рисунки 1.6б–г): WTEM (Wire Transverse Electromagnetic) [96], EUROTEM [97] и GTEM-камеры [98], а также их гибридизация с реверберационной [176] и безэховой камерами. Все модификации ТЕМ-камер, кроме самой первой, имеют две значительные конструктивные особенности: большие габариты и использование в них радиопоглощающего материала (РПМ) 1, тогда как остальные элементы камер (центральный проводник 2, корпус 3) имеют одинаковое назначение, но отличаются количеством, формой исполнения и геометрическими размерами.



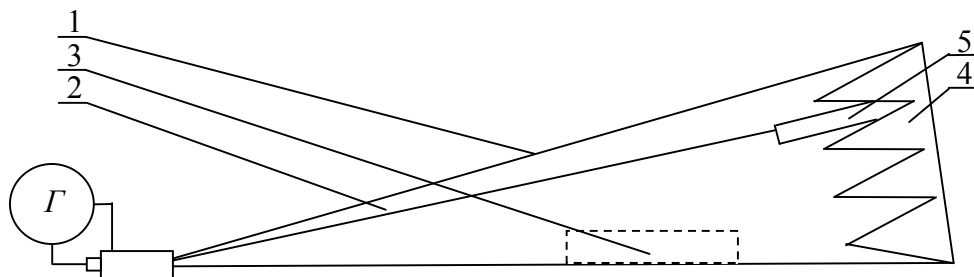
а



б



в



г

Рисунок 1.6 – Разновидности исполнения TEM- (а), WTEM- (б), EUROTEM- (в), GTEM-камера (г) (1 – корпус; 2 – центральный проводник; 3 – область под ИО; 4 – РПМ; 5 – согласованная нагрузка; 6 – массив проводников; 7 – фазовращатель)

1.3.1 TEM-камера

Требования по ЭМС РЭА устанавливают соответствующие уровни электромагнитных эмиссий (помехоэмиссии) и стойкости (помехоустойчивости). Их измерения и анализ проводят в соответствии с нормативными документами, в которых оговариваются также порядок проведения и необходимые измерительные приборы и устройства. Одним из устройств,

применяемых при исследовании и испытании интегральных схем (ИС), в соответствии со стандартами на помехоэмиссии IEC 61967-2 [99] и помехоустойчивость IEC 62132-2 [100], является ТЕМ-камера [95]. С её помощью можно проводить актуальные испытания [101], а также исследования по воздействию СКИ на ИС. Поскольку степень их интеграции с каждым годом растет, то растет риск повреждения ИС от импульсного [102] и непрерывного [103] воздействий, даже с малой амплитудой напряженности поля. Поэтому важно проводить идентификацию механизмов отказа ИС при воздействии как СКИ, так и электромагнитного излучения (ЭМИ) в широком диапазоне частот, и при необходимости повышать их помехозащищенность [104] или уменьшать уровень эмиссий от них [105]. Также, при помощи ТЕМ-камер, в зависимости от их характеристик, возможны исследования ЭЭ материалов [106], кабелей [107], корпусов компонентов [108] и блоков [109], измерения наводок на произвольно ориентированные микрополосковые линии [110, 111], испытания функциональных узлов и небольших устройств в целом. Исследования влияния, в ТЕМ-камере, импульсного электрического поля высокой амплитуды с наносекундной длительностью (3–300 нс) также нашли применение в биомедицинских исследованиях, например в лечении рака и генной терапии [112]. Однако, физические механизмы, лежащие в основе взаимодействия наносекундного импульсного электрического поля с живыми клетками, тканью или органами, до сих пор не ясны и активно исследуются [113, 114]. Таким образом, ТЕМ-камеры широко используются для испытаний как в области радиотехники, так и в биомедицине.

В настоящее время на рынке имеются следующие ТЕМ-камеры: Frankonia TEMF 500: $KCBH \leq 1,1$ при $f \leq 500$ МГц, $E = 350$ В/м, $d = 100$ мм; TEMF 3000: $KCBH \leq 1,2$ при $f \leq 3$ ГГц, $E = 1,4$ кВ/м, $d = 23,5$ мм [115]. Teseq DTEM: $KCBH \leq 1,2$ при $f \leq 400$ МГц, $d = 300$ мм [116]. Ряд ТЕМ-камер (рисунок 1.7) представлен фирмой Instruments For Industry (IFI), при этом $KCBH < 1,25$ [117].

Совершенствование ТЕМ-камер связано с их гибридизацией, а также расширением диапазона рабочих частот и увеличением внутреннего испытательного пространства. Диапазон рабочих частот ТЕМ-камеры достаточно широк, от постоянного тока до частоты моды TE_{11} , выше которой возбуждаются высшие типы мод TE и TM , что приводит к неконтролируемому воздействию на ИО. Размеры возможных ИО зависят от внутреннего испытательного пространства, увеличение которого снижает верхнюю граничную частоту, а, следовательно, повышает неравномерность распространения поля внутри ТЕМ-камеры на высоких частотах и увеличивает отклонение волнового сопротивления от заданного, как правило равного 50 Ом.

CC Series TEM Cells

DC – 2000 MHz • 1000 V/m Power Capability

Models & General Specifications:									
Model Number	DC to Maximum Frequency (MHz)	Maximum Test Object Size (inches)			Outside Dimension (Inches)			Septum Height	
		Length	Depth	Height	Length	Depth	Height	Inches	Meters
CC-100S	91	26.2	26.2	13.1	162	80	83	39.4	1.00
CC-101	100	22.6	22.6	7.6	140	72	51	26.6	0.68
CC-101S	100	22.6	22.6	11.3	140	72	72	34.0	0.86
CC-101.5	150	15.7	15.7	5.2	104	50	34	15.7	0.40
CC-101.5S	150	15.7	15.7	7.8	104	50	50	23.6	0.60
CC-102	200	11.8	11.8	3.9	77	38	26	11.8	0.30
CC-102EX	375	11.8	11.8	3.9	77	38	26	11.8	0.30
CC-102S	200	11.8	11.8	5.9	77	38	38	17.7	0.45
CC-102SEX	325	11.8	11.8	5.9	77	38	38	17.7	0.45
CC-103	300	7.9	7.9	2.6	54	26	18	7.9	0.20
CC-103EX	500	7.9	7.9	2.6	54	26	18	7.9	0.20
CC-103S	300	7.9	7.9	4.0	54	26	26	11.8	0.30
CC-103SEX	500	7.9	7.9	4.0	54	26	26	11.8	0.30
CC-104	400	5.9	5.9	1.9	42	20	14	5.9	0.15
CC-104EX	750	5.9	5.9	1.9	42	20	14	5.9	0.15
CC-104EXX	1000	5.9	5.9	1.9	42	20	14	5.9	0.15
CC-104S	400	5.9	5.9	2.9	42	20	20	8.9	0.23
CC-104SEX	750	5.9	5.9	2.9	42	20	20	8.9	0.23
CC-104SEX	1000	5.9	5.9	2.9	42	20	20	8.9	0.23
CC-105	500	4.7	4.7	1.5	34.3	16	11	4.7	0.12
CC-105EX	750	4.7	4.7	1.5	34.3	16	11	4.7	0.12
CC-105EXX	1000	4.7	4.7	1.5	34.3	16	11	4.7	0.12
CC-105S	500	4.7	4.7	2.3	34.3	16	16	7.1	0.18
CC-105SEX	750	4.7	4.7	2.3	34.3	16	16	7.1	0.18
CC-105SEX	1000	4.7	4.7	2.3	34.3	16	16	7.1	0.18
CC-108	800	2.9	2.9	0.9	24	11	8	3.0	0.08
CC-108EX	1200	2.9	2.9	0.9	24	11	8	3.0	0.08
CC-108EXX	1600	2.9	2.9	0.9	24	11	8	3.0	0.08
CC-110	1000	2.3	2.3	0.7	18.8	9	6	2.4	0.06
CC-110EX	1500	2.3	2.3	0.7	18.8	9	6	2.4	0.06
CC-110EXX	2000	2.3	2.3	0.7	18.8	9	6	2.4	0.06
CC-110S	1000	2.3	2.3	1.1	18.8	9	9	3.6	0.09
CC-110SEX	1400	2.3	2.3	1.1	18.8	9	9	3.6	0.09
CC-110SEX	1800	2.3	2.3	1.1	18.8	9	9	3.6	0.09

Рисунок 1.7 – Ряд ТЕМ-камер, выпускаемые фирмой IFI

Для улучшения характеристик камер применяют численные методы [118, 119], с помощью которых оптимизируются их геометрические параметры, а также оцениваются неравномерности распространения поперечного ЭМП. Анализ поперечного ЭМП в трёх плоскостях для ТЕМ-камеры, методом конечных разностей во временной области (FDTD), показал зависимость неравномерности распространения ЭМП от размеров неоднородных материалов и поглощения ЭМП ИО [120]. Также, методом конечных разностей во временной области проведено исследование наведенных токов на ИО, при воздействии ЭМП в ТЕМ-камере, а также введена метрика количественного изменения поверхностного тока, индуцированного на ИО при различных средах, с коррекцией между размерами ИО и ТЕМ-камерой [121]. В работе [122] приведен обобщающий подход к исследованию реактивных

сопротивлений ТЕМ-камеры с использованием метода моментов, представлены зависимости взаимодействия между камерой и ИО и влияние полей высших мод на ИО, а также уделено внимание изменению импеданса при внесении ИО и распределению поверхностных токов по ИО. Показано, что даже при небольших габаритах ИО поверхностные токи на ИО и обратные токи, проходящие по поверхности корпуса камеры, оказывают существенное влияние на равномерность распространения поля внутри камеры. Поскольку переходы из сужающихся частей в центральную часть корпуса, сужение центрального проводника, дополнительные устройства его крепления нарушают равномерность ЭМП [123], то оптимизируются параметры центрального проводника в местах его крепления к корпусу соединителя, а также длины центральной и сужающихся частей, при которых удастся получить хорошее согласование [124] камеры ($K_{CBH} < 1,02$) в диапазоне частот до 230 МГц и высоте камеры 360 мм. Для испытания больших ИО приведена [125] модифицированная ТЕМ-камера, которая удовлетворяет стандартам EN 55020 [126] для испытания жидкокристаллических телевизоров (диагональю до 47 дюймов) в диапазоне частот 150 кГц–150 МГц и может быть использована согласно IEC 61000-4-20 [127] для испытаний на ЭМС различной "крупной" РЭА. Увеличение рабочего испытательного пространства в ней достигается за счет новой формы центрального проводника, а также его согласования и калибровки с измерительным оборудованием. Оценка влияния высших мод на равномерность распространения поля в ТЕМ-камере, представленная в работе [128], показала необходимость правильной ориентации датчиков поля относительно направления распространения поля внутри камеры. Рассмотрены две различные конфигурации расположения датчиков электрического поля в прямоугольном вырезе в боковой стенке параллельно центральному проводнику при ориентации датчика перпендикулярно распространению ЭМП и в верхней стенке параллельно распространению ЭМП перпендикулярно плоскости центрального проводника. В обоих случаях вырез оказывает минимальное влияние, поскольку поверхностные токи на стенках камеры параллельны оси распространения основной моды электрического поля. Показано повышение значения напряженности поля на 20% при расположении датчика параллельно электрическому полю. Также приведено сравнение измерений равномерности распространения поля на частотах 500 МГц и 2,45 ГГц. При сравнении измерения напряженности поля на двух частотах разница составила 10%, при этом на частоте 2,45 ГГц наблюдалась хорошая симметрия и равномерность распространения ЭМП. В работе [129] приведены методы для подавления мод высших порядков в ТЕМ-камере. Выполнено численное моделирование и измерение модифицированной ТЕМ-камеры. Показана ТЕМ-камера для измерения ИС в частотном диапазоне от 1 ГГц до 2,5 ГГц. Научной группой С. Leat и А. J. Walters исследовано расширение верхней граничной частоты в

ассиметричной ТЕМ-камере. Сосредоточено внимание на основной TE моде и её подавлении с помощью активных систем с целью уменьшения амплитуды резонанса, а также возбуждения обратной составляющей поля через контур для ослабления основной моды [130]. Ими же в [131] решена проблема, связанная с возникающим TE_{111} резонансом в ассиметричной ТЕМ-камере. В основе конструкции лежит использование центрального проводника, в котором сделаны вдоль полуволновые прорезы с резистором 330 Ом посередине прорезы. В результате электрическое поле на резонансе TE_{111} уменьшилось приблизительно на 20 дБ.

Научной группой К. Malaric, J. Bartolic представлены модифицированные ТЕМ-камеры с волновым сопротивлением 75 Ом под увеличенный ИО, для частот сотовой связи 900–935 МГц [132]. Приведены результаты моделирования ТЕМ-камеры в программах Quickfield, использующей метод конечных элементов, и MAFLA, использующей метод конечного интегрирования. Показаны результаты измерения камеры для диапазона частот до 935 МГц при КСВН<1,1 [133].

Большинство вышеописанных ТЕМ-камер реализовано исходя из методик и аналитических оценок, которые получил M.L. Crawford из Национального бюро стандартизации (США) [95], описавший распространение поперечной ЭМВ вдоль волноводного тракта с характеристическим сопротивлением 50 Ом. Приближенные аналитические формулы [134] получены на основе экранированной полосковой линии [135], метода рефлектометрии во временной области [136] и экспериментального исследования краевой емкости [95]. Эти формулы усовершенствовал С.М. Weil при помощи численного анализа поперечного сечения линии передачи для нулевой и конечной толщины центрального проводника [137]. Группой К. Malaric, J. Bartolic [133] выполнено нормирование параметров геометрических размеров и приведены оптимальные графические зависимости для волнового сопротивления. Ниже приведены и структурированы формулы для приближенной оценки геометрических параметров ТЕМ-камеры.

Геометрическая структура ТЕМ-камеры показана на рисунках 1.8–1.10. Напряженность поля при расстоянии d между корпусом и центральным проводником в середине камеры, где поле уже сформировано и имеет равномерное распространение [95],

$$E_v = \frac{V_c}{d}, \quad (1.27)$$

где $V_c = \sqrt{P_n \cdot R_c}$ – напряжение на входе камеры, зависящее от мощности генератора P_n и сопротивления линии передачи $R_c=50$ Ом.

Исходя из расчетных критериев и экспериментальных оценок, высота ИО должна составлять не более $1/3$ от расстояния между нижней стенкой корпуса и центральным проводником, что определяет высоту камеры. Данное соотношение является удовлетворительным для равномерного распространения поперечной ЭМВ в прямоугольном волноводе с ИО и, как следствие, минимального отклонения коэффициента стоячих волн по напряжению (КСВН), так что, условие равномерности поля [133]

$$d \geq 3 \cdot z_1. \quad (1.28)$$

Длина прямоугольной части (рисунок 1.9) ТЕМ-камеры находится из условия [133]

$$L \geq 3 \cdot x_1, \quad (1.29)$$

где L – длина прямоугольной части корпуса камеры; x_1 – длина ИО.

Длина пирамидальных частей корпуса камеры:

$$L_1 = \frac{L}{2}. \quad (1.30)$$

Длина прямоугольной части центрального проводника L_2 (рисунок 1.8) камеры:

$$L_2 \approx 0,92 \cdot L. \quad (1.31)$$

Размеры камеры определяются согласно рисунку 1.12 с учётом соотношения [134]

$$w \approx 0,72 \cdot a, \quad (1.32)$$

где w – ширина прямоугольной части внутреннего проводника камеры; a – ширина корпуса.

Верхняя граничная частота ТЕМ-камеры определяется для T_{10} -волны [134]

$$f_{cp,1,0} = \frac{c}{2 \cdot a}, \quad (1.33)$$

где c – скорость света в вакууме.

Для согласования ТЕМ-камеры с измерительным оборудованием волновое сопротивление в каждом элементарном сечении (рисунок 1.10) камеры должно соответствовать 50 Ом, что определяется из условий (1.34)–(1.38) для нулевой и конечной толщины проводника (рисунок 1.11). Возможное расположение ИО внутри камеры показано на рисунках 1.9, 1.10.

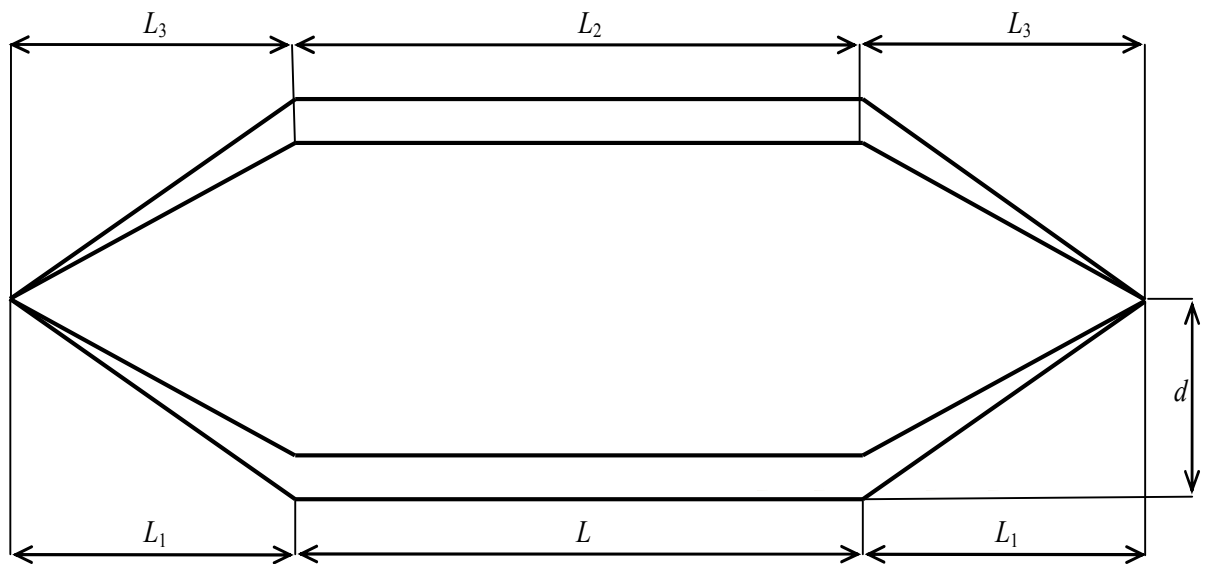


Рисунок 1.8 – Вид сверху продольного сечения ТЕМ-камеры с центральным проводником

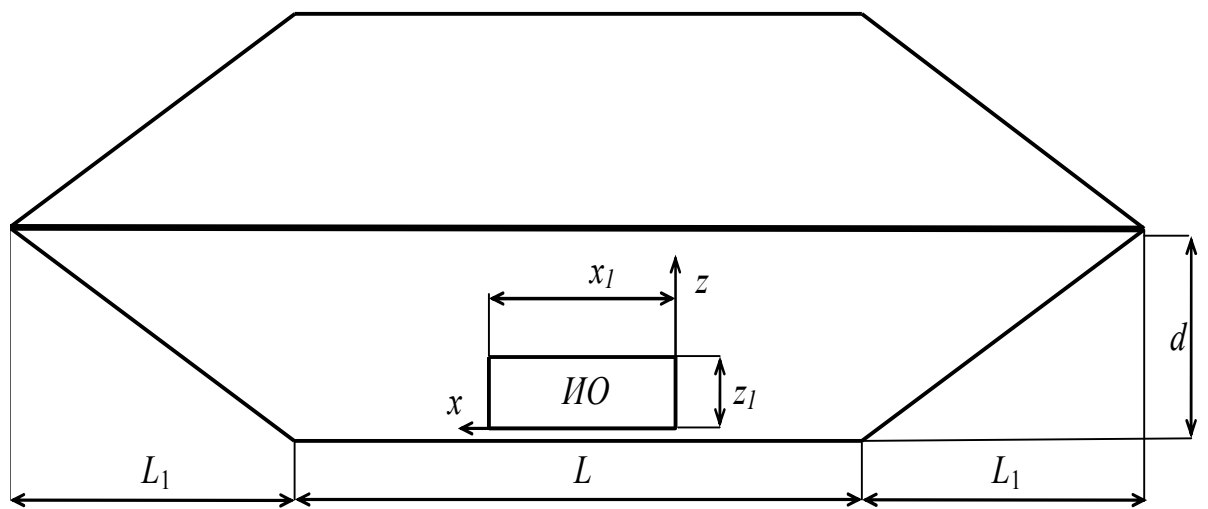


Рисунок 1.9 – Вид сбоку продольного сечения ТЕМ-камеры

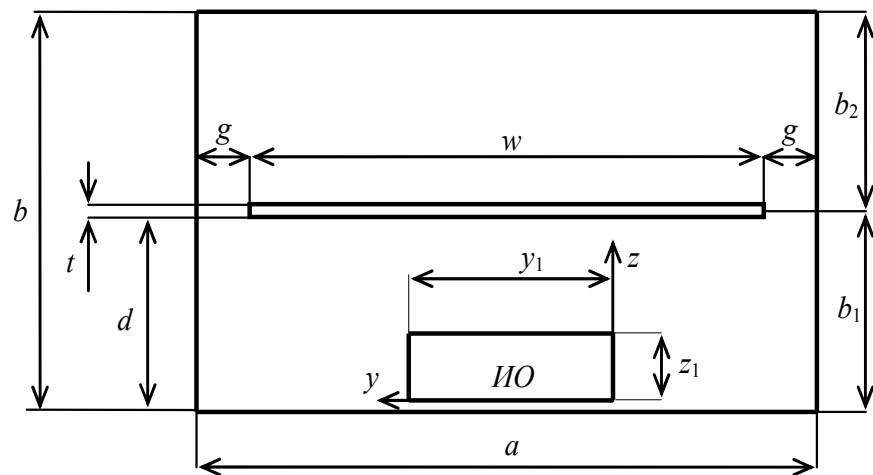


Рисунок 1.10 – Поперечное сечение ТЕМ-камеры

Расчёт волнового сопротивления для структуры с бесконечно тонким проводником выполняется по формуле [134]

$$Z_0 = \frac{n_0}{4 \cdot \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi \cdot g}{2 \cdot b} \right) \right) \right]} - \frac{C}{\varepsilon_0}, \quad (1.34)$$

где $n_0=120 \cdot \pi$ – характеристическое сопротивление воздушной среды; погонная ёмкость

$$\frac{C}{\varepsilon_0} = \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi \cdot g}{2 \cdot b} \right) \right) \right] - \frac{\Delta C}{\varepsilon_0}, \quad (1.35)$$

$$\text{где } \frac{\Delta C}{\varepsilon_0} = \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{1 + \sqrt{k}}{1 + \sqrt{\lambda}} \right)^2 \left(\frac{1 + k}{1 + \lambda} \right),$$

где k – волновое число; λ – длина волны в камере.

Расчёт волнового сопротивления для структуры с конечной толщиной проводника выполняется по формуле [133]

$$Z_0 = \frac{n_0}{4 \cdot \left[\frac{w}{b-t} + \frac{C_f'}{\varepsilon_0} \right]}, \quad (1.36)$$

где погонная ёмкость для $\frac{a-w}{2b} \geq 0,4$

$$\frac{C_f'}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{b}{b-t} \cdot \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right) + \ln \left(\frac{t(2b-t)}{(b-t)^2} \right) + \ln \left[\coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] \right] \dots, \quad (1.37)$$

а для $\frac{a-w}{2b} < 0,4$

$$\frac{C_f'}{\varepsilon_0} = \frac{2b}{\pi(b-t)} \ln \left[1 + \coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] + \frac{t}{a-w} \dots \quad (1.38)$$

На рисунке 1.11 показана зависимость волнового сопротивления от ширины центрального проводника $Z(w)$ камеры при изменении t от 0 до 5 мм. Видно, что волновое сопротивление камеры уменьшается на 2 Ом с увеличением t на 1 мм при заданных геометрических размерах корпуса. Это необходимо учитывать при расчёте геометрических размеров корпуса, граничной частоты и вычислении жесткости конструкции.

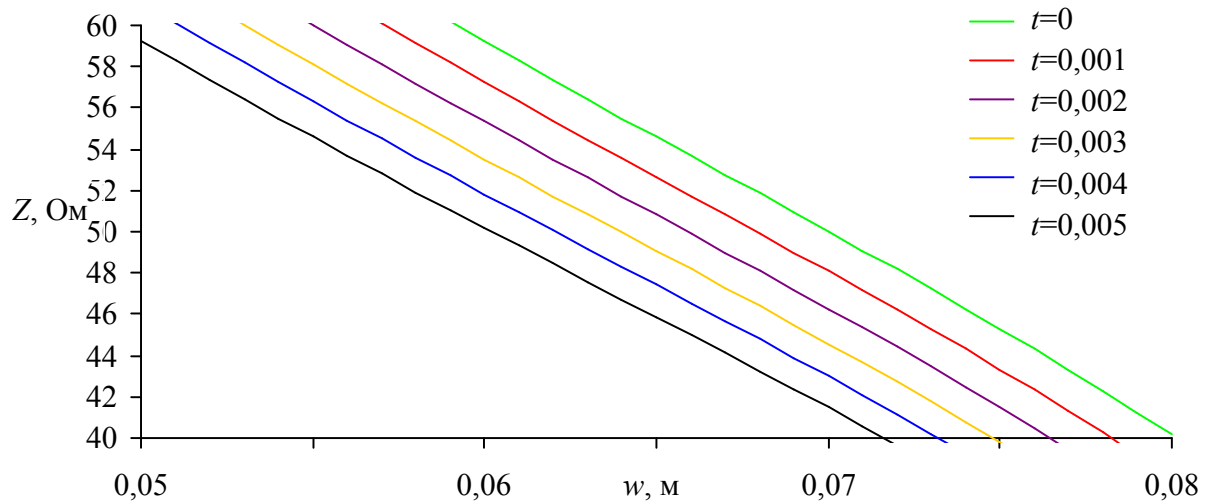


Рисунок 1.11 – Зависимость волнового сопротивления камеры от ширины прямоугольной части центрального проводника

Зависимость волнового сопротивления от нормированных геометрических размеров камеры показана на рисунке 1.12. Геометрия нормирована к высоте камеры (b), поскольку она согласно (1.28) пропорциональна высоте ИО. Нормируемыми выбраны следующие параметры: толщина проводника t , ширина проводника w и ширина корпуса a . Данными параметрами определяется волновое сопротивление ТЕМ-камеры [137].

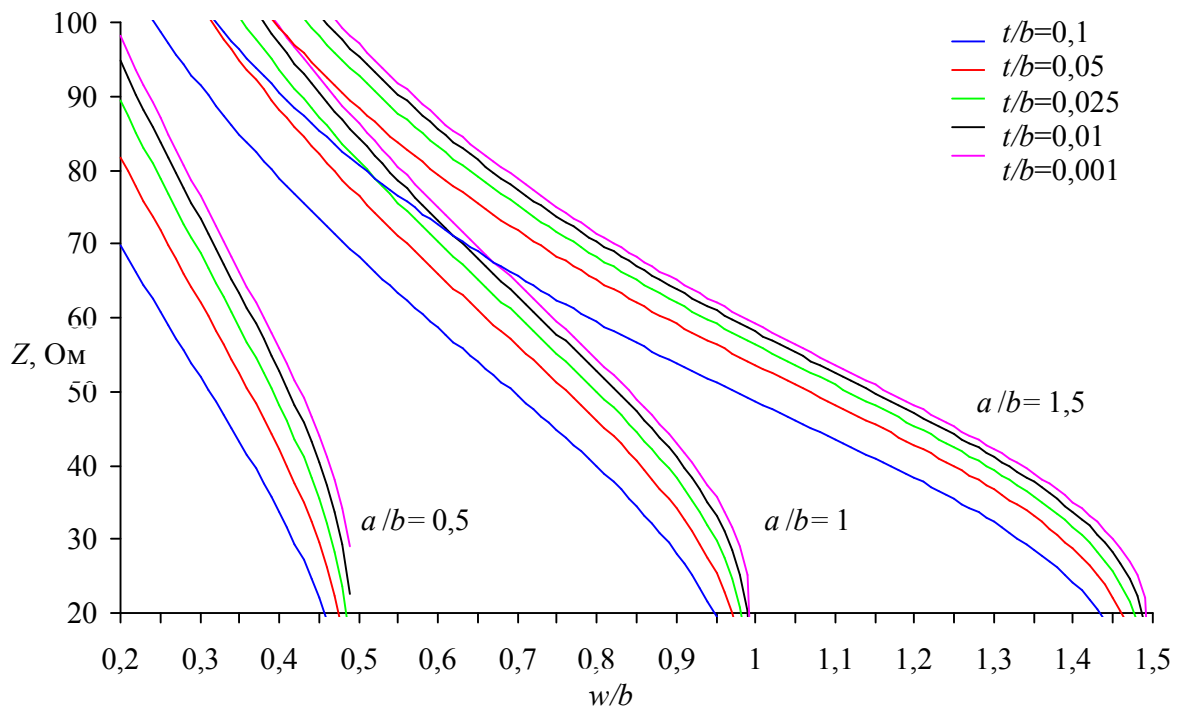


Рисунок 1.12 – Зависимости волнового сопротивления от конечной нормированной ширины проводника при разных t/b и a/b

Из рисунка 1.12 видно, что при изменении значения a/b изменяется значение w/b . Из этого следует, что в обоих случаях увеличивается зазор g между проводником и корпусом (таблица 1.1), а оптимальное значение $a/b \approx 1$. Зазор g более резко увеличивается при $a/b=0,5$, чем при $a/b=1,5$, следовательно, ширина центрального проводника оказывается меньше при $a/b=0,5$, но граничная частота увеличивается в соответствии с (1.33). Из зависимостей для разных t/b видно, что волновое сопротивление камеры уменьшается с ростом толщины проводника. Соответственно требуемое значение a/b должно быть около единицы, а t/b – стремиться к нулю, тогда соотношение w/a будет лежать в диапазоне $0,7 \leq w/a < 1$, что обеспечит большую площадь под ИО в плоскости zy и увеличение граничной частоты камеры.

Таблица 1.1 – Нормированная ширина центрального проводника w/b при $Z=50$ Ом

a/b	t/b				
	0,1	0,05	0,025	0,01	0,001
0,5	0,312	0,363	0,392	0,412	0,426
1	0,694	0,762	0,800	0,825	0,841
1,5	0,974	1,066	1,116	1,146	1,165
2	1,122	1,235	1,293	1,329	1,352

1.3.2 ГТЕМ-камера

ГТЕМ-камера получила наибольшее распространение, поскольку имеет превосходящие характеристики относительно остальных видов камер. По сравнению с ТЕМ-камерами, ГТЕМ-камеры обладают большей верхней граничной частотой, а также большим объемом под ИО. ГТЕМ-камера состоит из одной пирамидальной части и одного соединителя для подключения генератора. Внутри камеры (возле основания) расположен РПМ для высоких частот с нагрузкой в 50 Ом для низких частот. РПМ располагается так, что его вершины направлены на вершину ГТЕМ-камеры. В классической ТЕМ-камере центральный проводник расположен по центру камеры, тогда как в ГТЕМ-камере проводник смещен в верхнюю часть камеры, что позволяет проводить исследования для ИО большего размера [138].

Испытания с помощью ГТЕМ-камер проводят в соответствии со стандартом ИЕС 61000-4-20:2003 [127], который включает измерение помехоэмиссий и помехоустойчивости РЭС. Существуют различные ГТЕМ-камеры: открытого и закрытого видов, в вертикальном и горизонтальном исполнениях, в диапазоне рабочих частот до 25 ГГц. Основными характеристиками ГТЕМ-камеры являются: волновое сопротивление (Z), высота или объем под ИО (H), диапазон рабочих частот (f), значение максимальной подводимой мощности (P), напряженность поля в центре камеры (E), КСВН и ЭЭ камеры. В работе [139] представлен обзор коммерческих ГТЕМ-камер: Tescom TC–5063A (КСВН $\leq 1,7$ при $f=100$ МГц–3 ГГц; ЭЭ ≥ 80 дБ,

при $f \leq 2$ ГГц и $\Xi \geq 70$ дБ, при $f = 2-3$ ГГц; $E = 13$ дБмкВ/м при 1 мкВ на входе; $H = 220$ мм; вертикальное исполнение [140]); Frankonia GTEM 500 ($K_{CBH} \leq 1,2$ при $f = 10$ кГц–18 ГГц, $P = 500$ Вт, $H = 400 \times 400 \times 300$ мм³); Frankonia GTEM 1000 ($K_{CBH} \leq 1,2$ при $f = 10$ кГц–18 ГГц, $P = 700$ Вт, $H = 750 \times 750 \times 700$ мм³) [115]; Teseq GTEM 500 ($K_{CBH} \leq 1,45$ при $f \leq 20$ ГГц, $P = 100$ Вт, $H = 410 \times 410 \times 310$ мм³); Teseq GTEM 2000 ($K_{CBH} \leq 1,45$ при $f \leq 20$ ГГц, $P = 1$ кВт, $H = 1500 \times 1500 \times 1320$ мм³) [116].

Также, ведется много исследований, связанных с методами проведения испытаний и расширением технических характеристик камер. Так, в работе [141] описаны различные оценки для однородности поля согласно стандарту IEC 61000-4-20:2003, приведена методика, с помощью которой можно повысить эффективность измерений, проводимых с помощью TEM- и GTEM-камер в соответствии с указанным стандартом.

В работе [142] описаны проектирование, моделирование и оценка небольшой GTEM-камеры размером $2,2 \times 1,3 \times 1$ м, способной возбуждать электрические поля напряженностью свыше 600 В/м на ИО объемом до $200 \times 200 \times 150$ мм³. Моделирование, включая РПМ, выполнено с помощью гибридного FEM-MLFMM метода, представлены конструктивные решения и характеристики разработанной GTEM-камеры. В работе [143] рассматривается согласование сверхширокополосного коаксиального соединителя с GTEM-камерой. При моделировании соединителя применяется оценка двух видов энергии и выполняется квазистатическое 3D-моделирование для вычисления волновых сопротивлений соединителя и GTEM-камеры. Преимущества модели соединителя заключаются в простоте конструкции и малых вносимых потерях. Результаты моделирования в программе CST MWS показали, что верхняя граничная частота модели GTEM-камеры составляет 25 ГГц при $K_{CBH} \leq 1,62$ и $|S_{11}|$ меньше чем минус 12 дБ, в диапазоне частот от 0,5 до 25 ГГц.

В работе [144] рассмотрена зависимость точности измерений излучаемого электрического поля от кросс поляризации в GTEM-камере. Приведено численное моделирование для оценки напряженности электрического поля внутри GTEM-камеры. Для согласования, на низких и средних частотах, конца центрального проводника в GTEM-камере применяют массив нагрузочных сопротивлений, а на высоких частотах – РПМ. В работе [145] представлены подход и вычисление S -параметров для упрощенной модели конца центрального проводника с гибридной нагрузкой для GTEM-камеры, на низких и средних частотах. Представленный подход позволяет эффективно определить характеристики каждого элемента в нагрузочной цепи, тем самым, позволяя оптимизировать эффективность работы камеры.

В работе [146] представлено моделирование центрального проводника с резисторами согласования в программе Microwave Office. Приводятся результаты для K_{CBH} при

расположении резисторов по краям центрального проводника, за счет чего КСВН камеры улучшается.

В работе [147] предлагается методика, связывающая общие принципы проектирования семейства GTEM-камер, метод подавления стеночным поглощением и FRCTEM метод для проектирования GTEM-камеры с подавлением мод высших порядков. Для осуществления метода подавления стеночного поглощения на нижней стенке размещают РПМ. Его размещают на металлической пластине с двумя симметричными продольными вырезами вблизи от боковых стенок. Продольные вырезы предотвращают циркуляцию вихревых токов и дальнейшую передачу энергии ЭМВ высших порядков посредством принципа активного поглощения. Структура «металлическая пластина – поглотитель – нижняя стенка камеры» ведет себя как полосковая линия (ПЛ) передачи. Значительная часть электрического поля высших порядков концентрируется внутри РПМ. При этом РПМ большую часть энергии указанного электрического поля преобразует в тепло. В FRCTEM-методе резисторы с сосредоточенными параметрами с наличием и без наличия параллельных емкостей комбинируют с ферритовыми пластинами и пирамидальными углеродными поглотителями для подавления необходимых типов поперечных магнитных колебаний. Применение метода позволяет получить камеру с улучшенной однородностью поля, увеличенным рабочим объемом и увеличенной верхней граничной частотой. В работе [148] описывается методика корректировки частотной зависимости коэффициента отражения РПМ в GTEM-камере.

1.3.3 Полосковая линия

Нерегулярная однородная линия передачи, с заданным волновым сопротивлением, которая состоит из двух параллельных пластин, вдоль которых может распространяться поперечная ЭМВ, также называемая полосковой линией (ПЛ), используется для испытания РЭА на ЭМС. Первая конструкция ПЛ (рисунок 1.13) была разработана в 1965 г. [149]. Она состояла из алюминиевой пластины 1, закрепленной двумя опорами из пенополистирола 2 на фанерной плите, покрытой медным листом 3 и набора резисторов 4, соединяющих полосу с медным листом на дальнем конце линии, а на ближнем соединялась с генератором 5. Расчет волнового сопротивления производился по формуле (1.39). Разработка данной конструкции проводилась в рамках разработки нового метода испытания РЭА на ЭМС, в отличие от метода испытания, описанного в нормативном документе MIL-I-26600, что позволило более точно определить значение напряженности электрического поля, воздействующего на ИО.

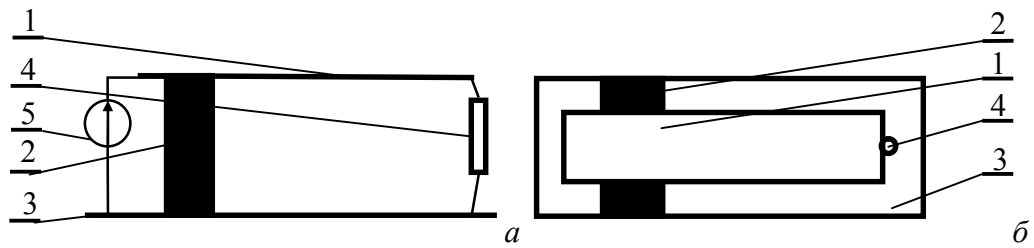


Рисунок 1.13 – Вид сбоку (а), вид сверху (б) ПЛ [149]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (1.39)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии; L_0 – погонная индуктивность линии (Гн/м); C_0 – погонная емкость линии (Ф/м).

Наиболее популярна конструкция ПЛ с клинообразными раскрытиями 1 на концах активного проводника 2, расположенного над опорным проводником 3 (рисунок 1.14).

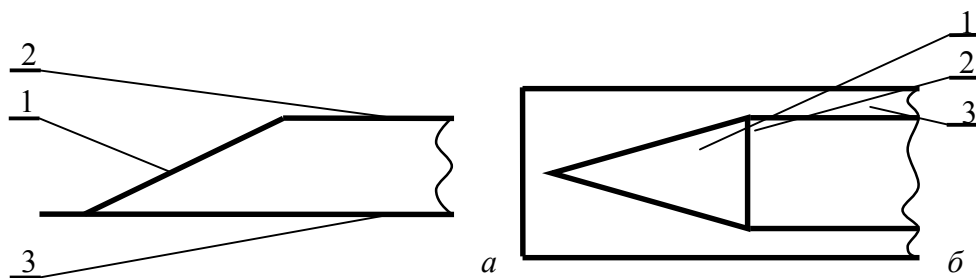


Рисунок 1.14 – Вид сбоку (а) и вид сверху (б) ПЛ с клинообразным раскрытием

Представлена конструкция клинообразной ПЛ для испытания автомобильных электрических кабелей на помехоустойчивость к внешнему ЭМП, отличающейся использованием согласующего устройства большей мощности [150]. Также, представлена [151] конструкция ПЛ с волновым сопротивлением 110 Ом. Приведены геометрические размеры и результаты экспериментальных измерений, в диапазоне частот до 500 МГц, с неравномерностью менее 5 дБ в области ИО. В нормативном документе ISO 11452-5-2002 [152] описана конструкция ПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом. ПЛ предназначена для испытания на помехоустойчивость ИО, применяемых для транспортных средств, а также различной РЭА, в диапазоне частот от 10 кГц до 400 МГц. Совершенствование конструкции и характеристик ПЛ выполняется для разных целей и задач. Разработана конструкция ПЛ [153] с КСВН < 1,45, в диапазоне частот от 80 МГц до 1 ГГц, который обеспечивается за счет раскрытия, повторяющего экспоненциальный контур антенны Вивальди. Конструкция с однократным изменением угла раскрытия ПЛ [154] предназначена для оценки помехоустойчивости ноутбука к микроволнам

высокой мощности. Также, разработана миниатюрная конструкция ПЛ [155] для небольших ИО. Предложена ПЛ для измерения ЭЭ материалов, а также соединителей и ИС, в диапазоне частот до 18 ГГц [156]. Таким образом, в настоящее время актуально совершенствование конструкций и характеристик ПЛ, применяемых для испытаний на ЭМС.

1.4 Совместные климатические и электромагнитные воздействия

1.4.1 Необходимость совместных испытаний радиоэлектронной аппаратуры

Одной из основных проблем при проектировании КА является термостабилизация бортовой РЭА, которая необходима для обеспечения её работоспособности в требуемом тепловом режиме, при заданных внешних климатических условиях окружающей среды [157]. Нормальная работа бортовой РЭА КА может быть гарантирована только при безотказном функционировании всех её систем, что требует на этапе проектирования проводить моделирование и испытания с учётом всех факторов, при которых эксплуатируется аппарат, в том числе при температурных и электромагнитных воздействиях. Конструктор должен обеспечить нормальную работу, например ИС, одновременно в заданном температурном диапазоне и при мощном электромагнитном облучении [[158]]. В проанализированных результатах [103] экспериментальных исследований механизмов повреждения современных ИС, вызывающих деградацию и катастрофические отказы ИС в полях мощного радиоизлучения, отмечается, что на стойкость ИС существенно влияют параметры радиоизлучения и конструктивно-технологические особенности ИС, а максимальные воздействия проявляются в импульсных полях, создающих наибольшие градиенты электрических полей и температур.

Разработано новое приложение к стандартам European Cooperation for Space Standardization (ECSS) [159], которое описывает разные испытания КА, в том числе (ECSS-E-ST-10-03C): общие (влагостойкость, определение срока службы, принудительные отказы), механические, целостности конструкции (герметичность, давление), тепловые (стойкость к воздействиям окружающей среды, вакуумные), электрические, радиочастотные и на ЭМС (эмиссии и устойчивость к кондуктивным и излучаемым электромагнитным помехам). Стандарт также описывает испытания, которые могут проводиться совместно (ECSS-E-ST-20-06C «Заряд космического аппарата» [160]), например, при электрических испытаниях в вакуумной камере ИО испытывается на ЭСР в наиболее ожидаемых местах его появления (острых диэлектрических кромках и металлических элементах), где могут возникнуть одиночные краевые, групповые или поверхностные разряды (в зависимости от потока энергии электронов, такие разряды являются основными источниками импульсных помех). В Российской Федерации требования по обеспечению ЭМС в части устойчивости к электромагнитным помехам РЭА в

диапазоне частот от 0 до 400 ГГц, установлены стандартом ГОСТ Р 51317.6.2-2007. Одним из основополагающих стандартов является ГОСТ Р 51317-4-3:2006 [161] (модифицирован по отношению к международному стандарту МЭК 61000-4-3:2006), рассматривающий вопросы испытаний на помехоустойчивость технических средств (ТС) от воздействия радиочастотных полей, создаваемых любыми источниками. Особое внимание в стандарте уделяется устойчивости ТС в условиях эмиссии помех от цифровых радиотелефонов и других радиочастотных излучающих устройств на частотах от 800 МГц до 6 ГГц. В таблице 1.2 регламентирована степень жесткости испытаний при воздействии амплитудно-модулируемого (АМ) сигнала с заданными (глубина модуляции 80 % с частотой $f=1$ кГц) параметрами. Время воздействия ЭМП на ИО на каждой частоте должно быть не менее времени, необходимого для воздействия на ИО и проверки реакции ИО на это воздействие, но не менее 0,5 с. Данный стандарт предусматривает испытание ТС с использованием безэховых камер. Однако в новой редакции стандарта ГОСТ Р 51317.6.2-2007 указано, что при испытаниях конкретных изделий допускается применение ТЕМ-камер в соответствии с МЭК 61000-4-20:2003.

Таблица 1.2 – Степень жёсткости испытаний [161]

Степень жесткости испытаний	Напряженность испытательного поля,	
	В/м	дБ (мкВ/м)
1	1	120
2	3	130
3	10	140
4	30	150
X	Специальная	
X – открытая степень жесткости испытаний, которая может быть установлена в стандартах на ТС конкретного вида и в технических документах на ТС.		

Повреждение ИС при облучении СВЧ излучением может происходить в результате комбинации повреждений p - n переходов и металлизации. Как правило, из строя выходят входные и выходные элементы. Наиболее распространенными механизмами повреждения ИС считаются вторичный пробой, плавление металлизации, пробой диэлектрика. Поэтому важно также проводить идентификацию механизмов отказа ИС при воздействии ЭМИ [103]. Как правило, измерение помехоэмиссий и помехоустойчивости проводят по двум группам (таблица 1.3) методик, стандартизированных международным электротехническим комитетом (МЭК) для испытания ИС. Исследование и испытания электронной компонентной базы (ЭКБ) проводят в соответствии данными методиками. Методики предполагают измерения излучаемых помех (помехоэмиссии) (IEC 61967) и помехоустойчивости ИС (IEC 62132), при нормальных климатических условиях. Данные стандарты определяют характеристики помех, излучаемых ИС и компонентами любого типа, в диапазоне частот от 150 кГц до 1 ГГц. Стандарт включает в

себя пять различных методов измерений как кондуктивных, так и излучаемых помех, а также методики, предложенные национальными комиссиями по проблеме ЭМС. В обоих нормативных документах (IEC 61967-2 [99] и IEC 62132-2 [100]) содержатся методы, с помощью которых измеряют эмиссии и устойчивость к ЭМП ИО, используя ТЕМ-камеры.

Указанные методики имеют существенное значение на ранних этапах проектирования устройств и выбора компонентов. Методики необходимо применять при оценке характеристик излучаемых помех и помехоустойчивости ИС с точки зрения наилучшей ЭМС устройств и их соответствия техническим требованиям.

Таблица 1.3 – Стандарты МЭК на методы измерения по ЭМС на ИС

IEC 61967	Интегральные схемы – Измерение электромагнитного излучения
IEC 61967-1	Основные условия и определения
IEC 61967-2	Метод измерения электромагнитного излучения с помощью ТЕМ-камеры
IEC 61967-3	Метод поверхностного сканирования
IEC 61967-4	Метод прямого соединения 1 Ом/150 Ом
IEC 61967-5	Стендовый метод с применением клетки Фарадея
IEC 61967-6	Метод магнитного зонда
IEC 62132	Интегральные схемы – Измерение электромагнитной помехоустойчивости
IEC 62132-1	Основные условия и определения
IEC 62132-2	Метод измерения с помощью ТЕМ-камеры
IEC 62132-3	Метод инъекции объемного тока
IEC 62132-4	Метод прямого введения мощности
IEC 62132-5	Стендовый метод с применением клетки Фарадея

Два из этих измерительных методов могут быть реализованы с помощью одной испытательной ПП (рисунок 1.15). Универсальная испытательная ПП для измерений методом ТЕМ-камеры (IEC 61967-2) конструктивно представляет собой квадрат со стороной 4" (10,14 см). Испытуемая ИС размещается со стороны сплошного полигона «земли» на ПП, а периферийные устройства (память, тактовый генератор, внешние порты ввода/вывода) – на обратной стороне. Эта же плата совместно со сканером ближнего поля может быть использована и при проведении измерений распределения ЭМП вдоль поверхности испытуемой ИС. При помощи подобного испытания возможно определение критических, с точки зрения излучения помех, выводов ИС. В типичном спектре помех, излучаемых микроконтроллером, резко выделяются по амплитуде гармоники системной тактовой частоты. При сравнении уровней излучаемых помех, полученных, например, на разных этапах проектирования ИС, используется огибающая спектрального сигнала. Например, в работе [162] описана методология и анализ измерений помехоэмиссий и помехоустойчивости микроконтроллера в ТЕМ-камере, согласно стандартам IEC 61967-2 и IEC 62132-2. Приведены измерения эмиссий от

входа/выхода ИС памяти [163]. Спектр помех, излучаемых ИС (микроконтроллер), при работе на тактовой частоте 40 МГц, показан на рисунке 1.16.

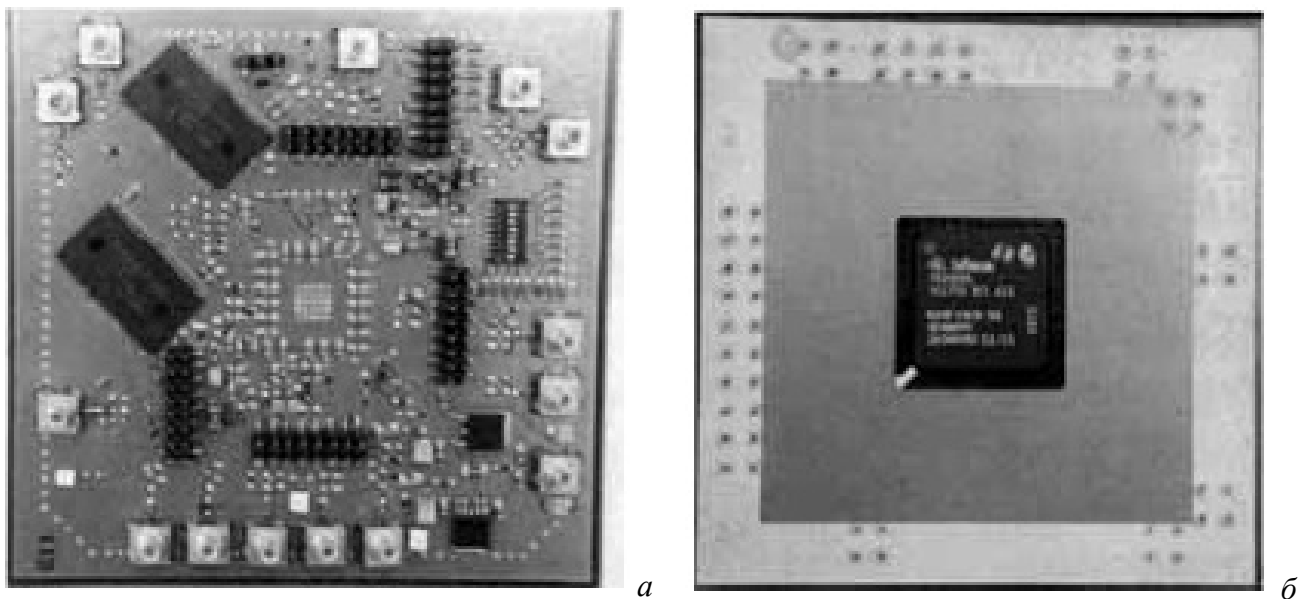


Рисунок 1.15 – Вид со стороны соединителей
и внешних компонентов (а) испытуемой ИС (б) на ПП

Также, измерения электромагнитного излучения от ИС проводят согласно SAE J 1752/3:2011-06-17 [164], в котором ИС монтируется на испытательный стол в виде ПП и крепится к нижнему вырезу в верхней или нижней части корпуса ТЕМ- или GTEM-камеры. Методика была разработана с использованием ТЕМ-камеры в диапазоне частот до 1 ГГц с испытательной ПП заданной геометрии и ориентацией её по отношению к камере и исключает любые соединения внутри камеры (они находятся на противоположной стороне ПП, по отношению к ИС). Один из портов ТЕМ-камеры соединяется с согласованной нагрузкой 50 Ом, другой соединен со входом анализатора спектра или измерительного приемника, с помощью которого проводят измерение радиочастотного излучения от ИС. Последние изменения (2011 г.) включают определение большего размера ПП для размещения больших ИС, а также расширенный диапазон частот измерений.

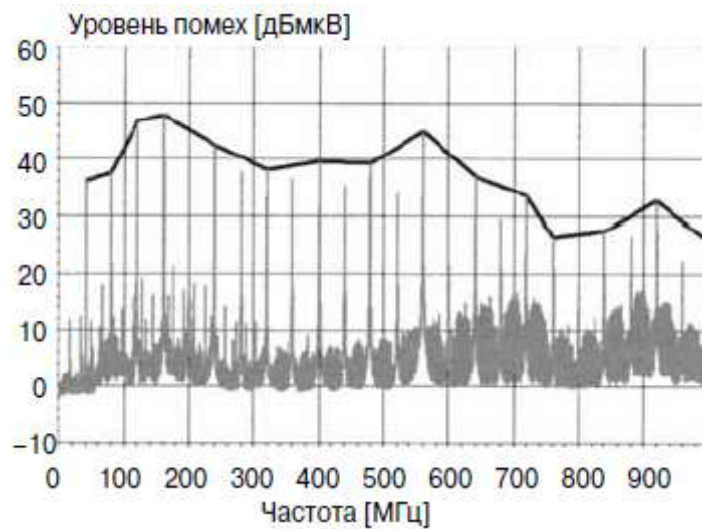


Рисунок 1.16 – Уровень помехоэмиссий от испытываемой ИС,
размещенной на ПП согласно IEC 61967-2

При работе ИС на пределах температурного диапазона риск возрастает, и катастрофический отказ функционального узла или блока критичной аппаратуры может стать более вероятным событием вследствие кратковременного перегрева р-п перехода, что предъявляет требования к совершенствованию испытаний в области ЭМС. Существующие методы электромагнитных испытаний требуют воспроизведения внешнего воздействия во всем диапазоне заданных частотных и амплитудных параметров, что предъявляет весьма жесткие и трудновыполнимые требования к испытательной базе.

Создание перспективных роботизированных устройств для работы в условиях Севера поможет при исследовании арктических регионов, что сведет к минимуму риск для человека. Разрабатываются различные роботизированные устройства, которые способны выполнить сложные работы в опасных или труднодоступных местах для человека, а также на больших глубинах в подводной акватории океана [165, 166]. В подобных условиях эксплуатации необходимо обеспечить не только проходимость, автономность движения и управления оборудованием робототехнического устройства, но и нормальную работу в заданном диапазоне температур, влажности и заданной электромагнитной обстановки всех радиотехнических блоков и узлов, отвечающих за приемопередачу информации и сигналов управления. На подобных устройствах имеются также и чувствительные к ЭМП узлы, например видеокамера, которая, как правило, служит для управления и захвата изображения и является «глазами» для человека с пункта управления. Силовых источников возбуждения ЭМП у подобного устройства может быть много, например антенны для передачи и управления, источники вторичного электропитания, устройства индукционного нагрева для стабильной работы критичного к температуре узла и пр. Таким образом, устройство может быть подвержено интенсивным

внешним климатическим, а также искусственным и естественным электромагнитным воздействиям, что в отсутствие защиты может вызвать сбой, вывести критичный узел или устройство из строя. Поэтому важно на этапе проектирования выявить особенности конструкции ЭКБ устройства, которые могут быть излучателями или приемниками ЭМП и одновременно рассеивать тепловую энергию или быть чувствительными к температуре.

Источники возбуждения ЭМП в арктических регионах могут быть как естественные, так и искусственные. Морская вода и лед как естественные источники возбуждения ЭМП издавна изучаются. Из [167, 168] известно, что течения и волны создают ЭМП, которые в морях и океанах представляют собой совокупность полей различных источников (магнитотеллурических, гидродинамических, физико-химических, грозовых) со сложным распределением амплитуд во времени и пространстве. Наличие специфических электрических и магнитных полей обусловлено гидродинамическими, физико-химическими и биоэлектрическими процессами. Особенность морских ЭМП обусловлена тем, что морская вода является хорошим проводником электричества и представляет собой совершенный экран для высокочастотных колебаний. Морской лед по своим электрофизическим свойствам не может быть строго отнесен к чистым диэлектрикам и представляет собой сочетание диэлектрических кристаллов и проводящей жидкой фазы в межкристаллических прослойках. Электрофизические эффекты, близкие к эффектам в чистых диэлектриках, но со специфическими особенностями, возникают при пластической деформации с формированием внутрикристаллических микротрещин. Способность возбуждения морским льдом естественных ЭМП радиодиапазона при деформационных процессах, в частности при упругой деформации льда, может происходить вследствие так называемого параметрического механизма. Кроме параметрического механизма возбуждения естественных ЭМП, в процессе образования микротрещины действует механизм, связанный с дискретным характером ее роста. Каждая микротрещина образуется в результате последовательности актов микроразлома, при этом для разделенных зарядов обеспечивается движение с ускорением и за счет этого возбуждается переменное (импульсное) ЭМП преимущественно большей мощности по сравнению с другими типами возбуждения. Путем синхронной регистрации импульсов (акустической эмиссии, оптической эмиссии, естественных ЭМП, сигнализирующих о возникновении микротрещины) экспериментально подтверждено существование искровых электрических разрядов при образовании микротрещин во льду. Например, с высоты 100 м по маршруту полета, пересекающему участок припайного льда и кромку припая, зарегистрировано возрастание напряженности естественных ЭМП от 3 до 5 мВ/м с приближением к кромке припая [168].

Таким образом, естественные ЭМП в арктических регионах возникают, но амплитуды их воздействия на чувствительные узлы критичной РЭА недостаточны для вывода их из строя. Однако подобные явления могут проявляться в виде шумов, добавляющихся к полезному сигналу. Это может потребовать дополнительной защиты от естественных ЭМП или их фильтрации, например в высокочувствительной приемной или измерительной аппаратуре.

Источником искусственного возбуждения ЭМП в арктических регионах может являться радиосвязь. Применение комбинированной СВ-КВ-УКВ-радиосвязи с глобальной навигационной спутниковой системой способно решить практически все задачи мониторинга сухопутного и водного транспорта Крайнего Севера и Арктики РФ [169, 170]. Применение радиосвязи может быть очень интенсивным в связи со сбоями навигаторов. Действительно, глобальная навигационная система состоит из группы спутников, располагающихся на круговой орбите (высота около 19100 км). Исследования в США ещё в 1969 г. показали, что на КА могут возникнуть электрические потенциалы высокого уровня за счет взаимодействия элементов конструкции КА с горячей разреженной плазмой [171]. При этом накапливается заряд на различных частях КА в зависимости от его конструкции и материала, который перераспределяется с возможным возникновением ЭСР, в зависимости от внешних условий: температуры, концентрации плазмы и солнечного освещения. Оснащенные чувствительной электроникой, современные КА подвержены уязвимости со стороны излучаемых и кондуктивных электромагнитных помех, созданных ЭСР. При этом разряды, возникающие на внешней поверхности, могут наводить помехи на внутренние элементы, что может вызвать катастрофический отказ в работе бортовой РЭА. Причинами отказа многих зарубежных КА считается ЭСР, который мог происходить в период сильной геомагнитной возмущенности магнитосферы при высокой солнечной активности. Результаты аномалий на зарубежных КА из-за ЭСР приведены в работе [172]. Примечательно, что на круговой орбите в арктических регионах такая активность может особенно сильно проявляться, а переход к ЭКБ, использующей более низкие уровни напряжений сигнала, обостряет эту проблему.

Показательно, что в период сильных геомагнитных бурь оказываются уязвимыми не только чувствительная прецизионная электроника, но и силовые цепи питания. Так, например, в работе [173] выполнена оценка стойкости сети электропитания к воздействию геомагнитных бурь и подобных преднамеренных воздействий: геомагнитно наведенные токи вызвали массово зафиксированные влияния на сети электропитания, насыщенные энергетическим оборудованием в регионах Северной Америки. Между тем аналогичное воздействие в Арктике могло бы вызвать не меньшие влияния. Поскольку в высоких широтах аналогичные явления

могут происходить достаточно часто, это может повлиять на работу не только чувствительной РЭА, но и силовых цепей.

В современной бортовой РЭА КА используется большое количество полупроводниковых компонентов, требования по защите которых от ионизирующего и неионизирующего излучений ужесточаются. При этом некоторые из них, работая в активном режиме, могут нагреваться и рассеивать тепловую энергию в окружающее пространство, тем самым нагревая соседние компоненты. Известно, что вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода при воздействии температуры сильно изменяется (рисунок 1.17а). Из-за этого меняется амплитуда полезного сигнала. Кроме того, изменяется амплитуда сигналов высших гармоник и комбинационных частот вследствие нелинейности ВАХ. При этом печатные проводники платы или провода (свойства которых могут также изменяться от температуры), к которым подключен полупроводниковый компонент, излучают ЭМП на всех этих частотах [174]. Амплитуда излучаемых эмиссий в зависимости от температуры будет также изменяться, а следовательно, будет изменяться воздействие на близлежащие чувствительные цепи, что может быть критичным в случае их слабой помехоустойчивости. Примечательно, что существующие стандарты по ЭМС не предусматривают измерения излучаемых эмиссий при воздействии температуры на ИО. Таким образом, результаты, полученные в ходе испытаний устройства, могут отличаться по уровням излучений и восприимчивости от существующих в реальных условиях эксплуатации.

Качественные оценки, приведенные выше, подтверждаются гармоническим воздействием с напряжением 1 В и частотой 1 МГц на диод (рисунок 1.17 б). Напряжение на нагрузке диода показано на рисунке 1.18. Как видно, оно уменьшается с ростом частоты. Примером для оценки излучаемого ЭМП может являться диполь длиной 10 мм, имитирующий, например, отрезок провода или монтажный лепесток с печатной трассой от диода. В программе TALGAT [175] вычислена максимальная напряженность электрического поля от такого диполя, возбуждаемого полезным сигналом и его гармониками (например, диода, подключенного к лепестку) при разных температурах. Из вычисленных значений (рисунок 1.18) видно, что на частоте полезного сигнала (1 МГц) уровень напряженности поля вырос в 3 раза, при температуре +200°C по отношению к температуре +25°C и снизился в 1,6 раза при температуре –65°C. Дальнейшее увеличение уровня напряженности поля пропорционально амплитуде гармоник. На третьей гармонике напряженность поля достигает максимума, увеличившись в 6 раз при температуре +200°C по отношению к полезному сигналу при нормальной температуре. Такой рост обусловлен повышением частоты гармоники при слабом снижении её амплитуды. На четвертой

и высших гармониках наблюдается снижение уровня напряженности поля за счет резкого снижения уровня амплитуд гармоник.

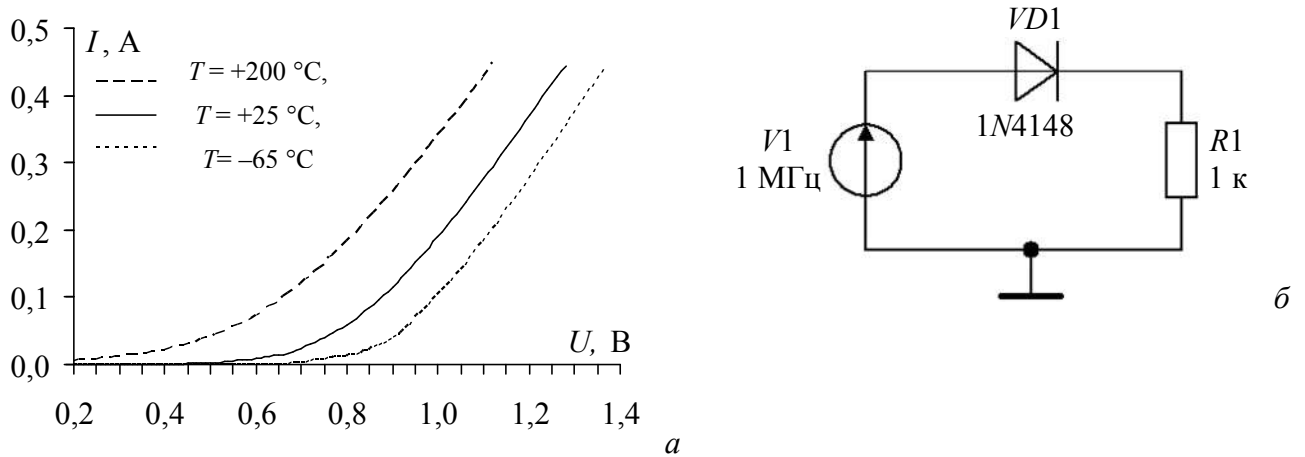


Рисунок 1.17 – ВАХ (а) и схема воздействия (б) для диода 1N4148 при температурах -60 , $+25$, $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [174]

Обзор различных ТЕМ- и ГТЕМ-камер [139] (открытого и закрытого вида, в вертикальном или горизонтальном исполнении, с разным волновым сопротивлением и подводимой мощностью, в диапазоне рабочих частот до 2 ГГц, для ТЕМ-камер и до 20 ГГц – для ГТЕМ-камер) показал невозможность проведения испытаний при контролируемых климатических условиях, например, при одновременном воздействии на ИО температуры и ЭМП. Особенности конструкции ТЕМ- и ГТЕМ-камер затрудняют создание и поддержание в их внутреннем объеме равномерного электромагнитного и температурного полей и влажности воздуха, созданных отдельно путём помещения их в климатическую камеру, а применение РПМ в конструкции ГТЕМ-камеры может значительно сузить рабочий диапазон температур и влажности воздуха внутри климатической камеры. Поэтому целесообразно выполнить разработку устройства способного во внутреннем испытательном контейнере воздействовать на ИО одновременно температурным и электромагнитным полями, при заданной влажности воздуха.

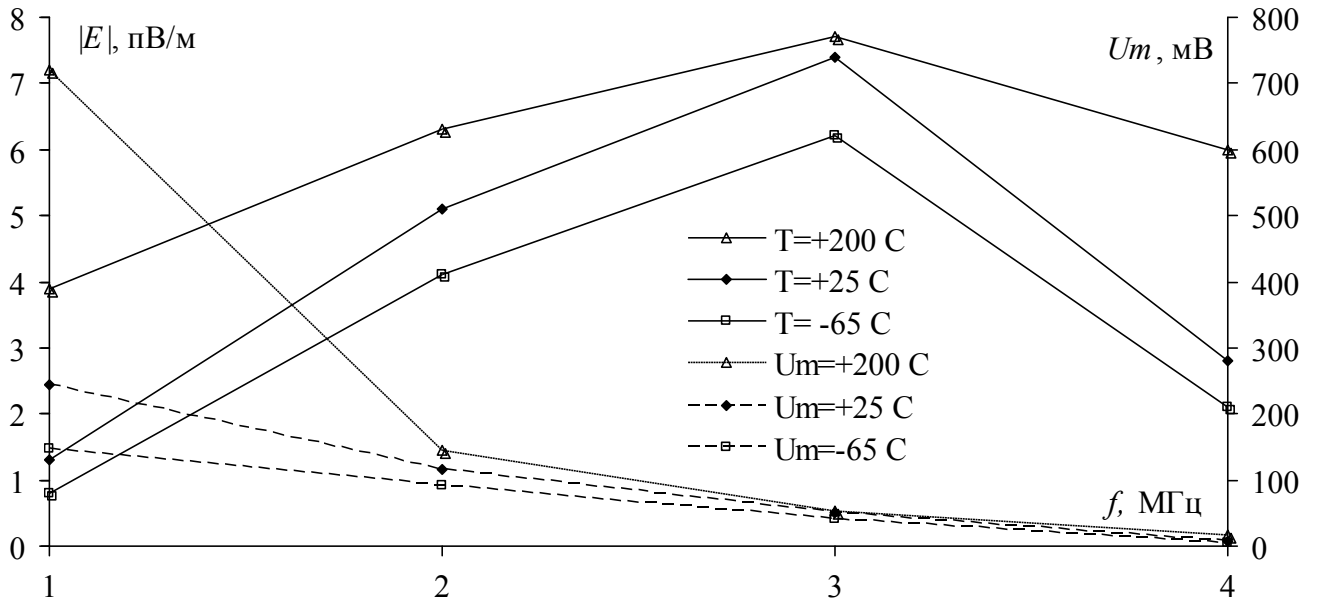


Рисунок 1.18 – Уровни напряженности поля (—), создаваемые диполем длиной 10 мм, возбуждаемым амплитудами U_m (---), на частотах 1, 2, 3, 4 МГц [174]

В настоящее время ведущими научными сообществами в области ЭМС активно развиваются идеи по гибридизации: созданию ТЕМ-реверберационной и GTEM-реверберационной камер. Результатом гибридизации является повышение рабочего диапазона частот и равномерности поля внутри камеры. Гибридизация ТЕМ-камеры с реверберационной камерой позволяет подавить высшие типы мод и расширить диапазон рабочих частот до 18 ГГц, за счет применения РПМ, а также уменьшить габариты (в 3 раза) и неравномерность поля внутри реверберационной камеры [176]. Также, известна климатическая камера [177], предназначенная для проведения испытаний ИО на ЭМС. ЭМП в камере создает отдельный излучатель, расположенный внутри небольшого рабочего объема камеры, так что данный вид измерения невозможно считать корректным. Камера имеет низкую ЭЭ, что говорит о невозможности защиты от внешнего излучения ИО в широком спектре гигагерцового диапазона. В данном виде камер нет возможности контролировать влажность воздуха, что для большинства стандартов по ЭМС является существенным. Также, нет возможности проводить видеонаблюдение результатов воздействия ЭМП на исследуемый БО, в климатически заданных условиях. Кроме того, существуют разнообразные комбинации электротехнических и медицинских устройств для изучения воздействия ЭМП на БО, например изучение удельного поглощения электромагнитной энергии БО в открытой ТЕМ-камере, в которой размещена чаша Петри [178], с использованием медицинских стёкол [179] или лабораторных сосудов в открытой GTEM-камере [180].

1.4.2 Исследования биологических объектов

В настоящее время учеными со всего мира ведутся исследования по влиянию ЭМП на БО. Подобные исследования проводят не только на поверхности земли, но и в открытом пространстве, на борту КА. Полученные в последнее время данные о воздействии ЭМП на БО, в том числе в ходе экспериментальных данных по воздействию ЭМП на человека (космонавта) при полете КА в магнитосфере [181], говорят о том, что подобные воздействия являются неблагоприятными [182] для человека на борту пилотируемого КА. Уровень воздействия ЭМП, установлен и должен соответствовать нормам по ГОСТ Р 50804-95 [183], однако с увеличением времени пребывания человека на борту и количества систем, входящих в состав бортовой РЭА КА, человек подвергается большему воздействию ЭМП, спектр и амплитуды которого достаточно широки [184, 185], а источники разнообразны. Установлено, что ЭМП влияет на биохимические, физиологические и функциональные процессы, протекающие в живых организмах, поэтому переоценить важность этого фактора для человека невозможно [186–188]. Важной составляющей любого живого организма является белок (строительный материал всего организма). Проводятся различные исследования по электромагнитному и тепловому воздействиям на клеточную пролиферацию и образование белков теплового шока при различных температурах в живых клетках тканей, что позволяет оценить роль температуры в возможных биологических эффектах, связанных с воздействием ЭМП [189–192]. Раньше считалось, что действие ЭМП исключительно тепловое, однако некоторые исследования показали, что есть и нетермические эффекты при воздействии ЭМП [187, 193]. Поэтому особое внимание во время проведения исследований по воздействию ЭМП на БО необходимо уделять контролю температуры. Большинство исследований по воздействию ЭМП на БО проводится при температуре 37°C с необходимой влажностью воздуха, что обеспечивает чистоту эффекта воздействия ЭМП и позволяет оценить возможные биологические эффекты, связанные с воздействием ЭМП на БО [194]. Также, для нормальной физиологической деятельности БО необходимо поддерживать определенные атмосферные условия и функционирование различных БО, подвергающихся длительному воздействию [195], что требует создания определенных условий (дыхание, питательные вещества, температура окружающей среды), характерных для конкретного БО. Одним из распространенных устройств для проведения исследований по влиянию ЭМП на БО является ТЕМ-камера. Разрабатывают специальные конструкции ТЕМ-камер, позволяющие разместить в её внутреннем объеме БО, обеспечивая правильное его позиционирование и фиксацию. Например, разработана [196] специальная система держателей и фиксаторов для размещения чаш Петри внутри ТЕМ-камеры для равномерного воздействия ЭМП на клеточный монослой, посредством круглосуточного вращения пластиковых

контейнеров с вентиляционными отверстиями, в которые могут быть помещены животные, а механизм охлаждения животных, основан на обмене воздуха, с помощью вентиляторов через воздухозаборник, расположенный в стенке инкубатора [197]. В работе [194] представлена конструкция камеры, в которую вмещается до 12 взрослых животных (мышей), длина ТЕМ-камеры при этом достигала 120 см, а поступление воздуха к животным осуществлялось через решетчатую стенку камеры. Заданная температура обеспечивалась терморегулятором и внешними контурами из металлических трубок, находящихся в контакте с верхней и нижней стенками камеры, по которым циркулировала вода заданной температуры. Тем самым обеспечивалось термостатирование, при температурах 20–30°C. Как правило, контроль результатов воздействия на БО в ТЕМ-камере проводят двумя методами: слепого воздействия и наблюдением в режиме реального времени. При слепом воздействии, изменения в исследуемом БО оцениваются по окончании воздействия, что не позволяет отследить динамику изменений. Однако, для наблюдения в режиме реального времени конструкция ТЕМ-камеры усложняется и нарушается целостность корпуса, что увеличивает неравномерность распространения ЭМП и снижает ЭЭ корпусом камеры. Например, в работе [198] представлена конструкция ТЕМ-камеры с отверстием в нижней части корпуса, в котором располагалось покровное стекло, что позволяло осуществлять визуальный контроль клеток с помощью перевернутого микроскопа. Для уменьшения неравномерности поля внутри устройства, в отверстии размещалась медная сетка. В работе [199] чаши Петри, содержащие питательные среды с клетками, были установлены на предметном столе перевернутого микроскопа. В нижней стенке ТЕМ-камеры имелось отверстие для наблюдения за БО с помощью длиннофокусного объектива микроскопа. Согласно [190], масштаб биологических эффектов воздействия ЭМП зависит от времени воздействия, а максимальный эффект достигается при продолжительном воздействии. При проведении исследований по выявлению биологических эффектов с длительным воздействием ЭМП на БО необходимо поддерживать оптимальные условия окружающей среды в ТЕМ-камере, тем самым контролируя температуру БО в течении всего эксперимента. В большинстве исследований для контроля температуры используется температурный датчик (ТД), введенный в ТЕМ-камеру, через отверстие в корпусе диаметром 5–10 мм [198]. Оптоволоконный ТД внутри чаш Петри помещался вертикально в клеточную суспензию, через отверстия в верхней стенке ТЕМ-камеры и крышке чаши Петри [195]. При использовании [200] чувствительных к температуре флуоресцентных красителей (молекулы родамина), возможно подсвечивать клетки при помощи светодиода, соединенного оптическим волокном диаметром 1 мм с микроскопом. В качестве источника сигнала используют модулированное радиочастотное воздействие,

поскольку оно снижает репродуктивную способность насекомых на 50–60%, в то время как немодулированное воздействие лишь на 15–20% [201].

1.5 Цель работы и постановка задач исследования

1.5.1 Экранирование

Из выполненного обзора п. 1 следует, что экранирование является неотъемлемой частью любой РЭА, в том числе и бортовой РЭА КА, а устройства, позволяющие выполнить измерение помехоэмиссий и помехоустойчивости РЭА, нуждаются в расширении их технических характеристик и возможностей, с целью приближения работы РЭА к реальным условиям эксплуатации. Кроме того, чувствительные цепи необходимо защищать от разнообразных по характеру внешних электромагнитных помех. С этой целью важно экранировать не только корпус и кабель, но и соединитель. Из п. 1.2.1 следует, что специфичность разработанных экранов говорит о конкретном месте их применения, что требует собственных рекомендаций по повышению ЭЭ. Например, оценка значений резонансных частот и ЭЭ корпусом соединителя при полном раскрытии [202], выявила резкое ухудшение экранирования в области резонансов корпуса, что для бортовой РЭА достаточно критично. Строгий подход к решению задач ЭМС требует точного геометрического моделирования сложной формы реальных корпусов и экранов бортовой РЭА КА, а также электродинамического моделирования в диапазоне параметров с последующей оптимизацией. Однако, электродинамическое моделирование достаточно затруднительно для неподготовленного специалиста в данной области и требует значительных вычислительных ресурсов, временных и денежных затрат, что на первоначальных этапах проектирования нецелесообразно для получения быстрых оценок экранирования. Методики быстрого аналитического вычисления ЭЭ корпусом привели Robinson M.P. и др. в 1996–1998 гг. и в дальнейшем усовершенствовали Po'ad F.A., Thomas D.W.P, Shi D., Shim J. и др. Недостатком данных методик, является то, что они не исследованы на корпусах малого размера, а в основном апробируются на корпусах с большими геометрическими размерами (120×300×300 мм) и в диапазоне частот до 1 ГГц. Таким образом, остается не выявленной возможность применения их для корпусов малых размеров, например, соединителей, которые имеют относительно небольшие размеры. Так, корпус соединителя низкочастотного прямоугольного (СНП–393), применяемого в бортовой РЭА КА, имеет внутренние геометрические размеры 9×29,5×21,5 мм. Также, существующие методики вычисления ЭЭ, представленные Shi D., Belkacem F.T. и Shim J., требуют численного интегрирования коэффициента связи апертуры с корпусом, что затрудняет аналитическую оценку ЭЭ. Также, в настоящее время отсутствуют программные модули, способные произвести быструю оценку ЭЭ корпусом с различными геометрическими размерами и расположением апертуры в стенке корпуса. Кроме того, из обзора, (см. п. 1.1 и

1.2.2), следует, что особый интерес для экранирования представляют легкие металлы и их сплавы. Однако, не исследована методика и не имеется программных средств для получения быстрых сравнительных оценок ЭЭ материалами, применяемыми в бортовой РЭА КА в частотном диапазоне от 10 кГц до 18 ГГц, при изменении толщины металла и расстояния от источника помех до экрана для электрического, магнитного и электромагнитного полей. Между тем, эта оценка может быть очень полезна при проектировании бортовой РЭА КА. Предварительный анализ показывает возможность получения с помощью аналитических формул в замкнутом виде приближенных сравнительных оценок для выбора металла и параметров экранирования бортовой РЭА КА.

Поэтому актуальна разработка аналитических методик вычисления и программных средств, позволяющих выполнить быструю оценку ЭЭ для различных геометрических размеров корпуса с апертурой, а также различными материалами для разных компонент электрического, магнитного и электромагнитного полей. Также, актуальна разработка мер и рекомендаций по повышению ЭЭ корпусом с апертурой.

1.5.2 Устройства для проведения испытаний в области электромагнитной совместимости и исследований в биомедицине

Из обзора (п. 1.2.4) следует, что ТЕМ-камеры применяются для измерения уровня восприимчивости к импульсному ЭМП в области ЭМС, в известном военном стандарте армии США (MIL-STD-461F). Также, с их помощью проводят актуальные исследования и испытания в биомедицине [203] и радиотехнике [219]. В частности, проводят измерение помехоэмиссии и помехоустойчивости ИС, небольшой РЭА, а также измерение ЭЭ материалов и корпусов. Особенностью этих камер, кроме диапазона рабочих частот, является эффективная зона ИО, которая может служить критерием выбора размера камеры. Значение КСВН, определяющее неравномерность ЭМП вдоль камеры, может также повлиять на измерения. Все это доказывает, что данные виды камер требуют совершенствования не только внутренних характеристик, но и добавления новых функций, которые приближают испытания ИО к реальным условиям. Таким образом, актуальна задача нахождения оптимальных геометрических форм элементов ТЕМ-камеры, а также расширения диапазона её рабочих частот, при минимальной неравномерности поля во внутреннем увеличенном испытательном пространстве.

Для расширения круга охватываемых параметров камеры необходимо провести аналитическую оценку для разных вариантов (для разных габаритов ИО) исполнения ТЕМ- и ГТЕМ-камер. Для корректности аналитически вычисленные размеры поперечного сечения должны быть подтверждены квазистатическим анализом. По его результатам необходимо

выполнить оптимизацию пирамидальной и прямоугольных частей камер. По оптимальным результатам необходимо выполнить электродинамический анализ с оптимизацией моделей ТЕМ- и GTEM-камер. Так, задачи структурной оптимизации заключаются в реализации формы раскрыва пирамидальной части, а параметрической – в достижении номинально допустимых размеров длин и поперечных сечений. Целевой функцией оптимизации является минимизация максимального значения $|S_{11}|$ в заданном диапазоне частот при разных формах и параметрах пирамидальной и прямоугольной частей ТЕМ-камер. В итоге, должны быть получены оригинальные конструкции ТЕМ- и GTEM-камер.

Цель работы – выполнить анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата, а также создать устройства для испытаний на электромагнитную совместимость и биомедицинских исследований с возможностью климатических воздействий на объект.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику для быстрой оценки ЭЭ металлической пластиной и корпусом с апертурой.
2. Предложить способы повышения ЭЭ корпусов с апертурой, используемых в бортовой РЭА КА.
3. Разработать устройства на основе линий передачи с повышенными техническими характеристиками относительно существующих.
4. Разработать устройство для испытаний РЭА на совместные климатические и электромагнитные воздействия, с возможностью его применения для биомедицинских исследований.

2. Анализ эффективности экранирования элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата

В данном разделе представлены результаты вычисления ЭЭ с помощью программы TALGAT [204]:

- электрического, магнитного и электромагнитного полей в диапазоне частот от 10 кГц до 20 ГГц пластинами алюминия и сплава магния МА2–1;
- соединителя типа СНП 339 на различных расстояниях в глубине корпуса, при полном и уменьшенных раскрывах щели со стороны кабеля;
- унифицированных электронных модулей (УЭМ) с щелью между ними;
- корпуса радиотракта с построением диаграмм направленности на рабочих и резонансных частотах;
- корпуса блока системы автономной навигации (САН) КА;
- приведено полученное в замкнутом виде выражение для связи апертуры с корпусом в аналитической модели для ЭЭ корпусом с апертурой;
- приведена методика анализа ЭЭ пластиной и прямоугольного корпуса с апертурой.

2.1 Металлическая пластина

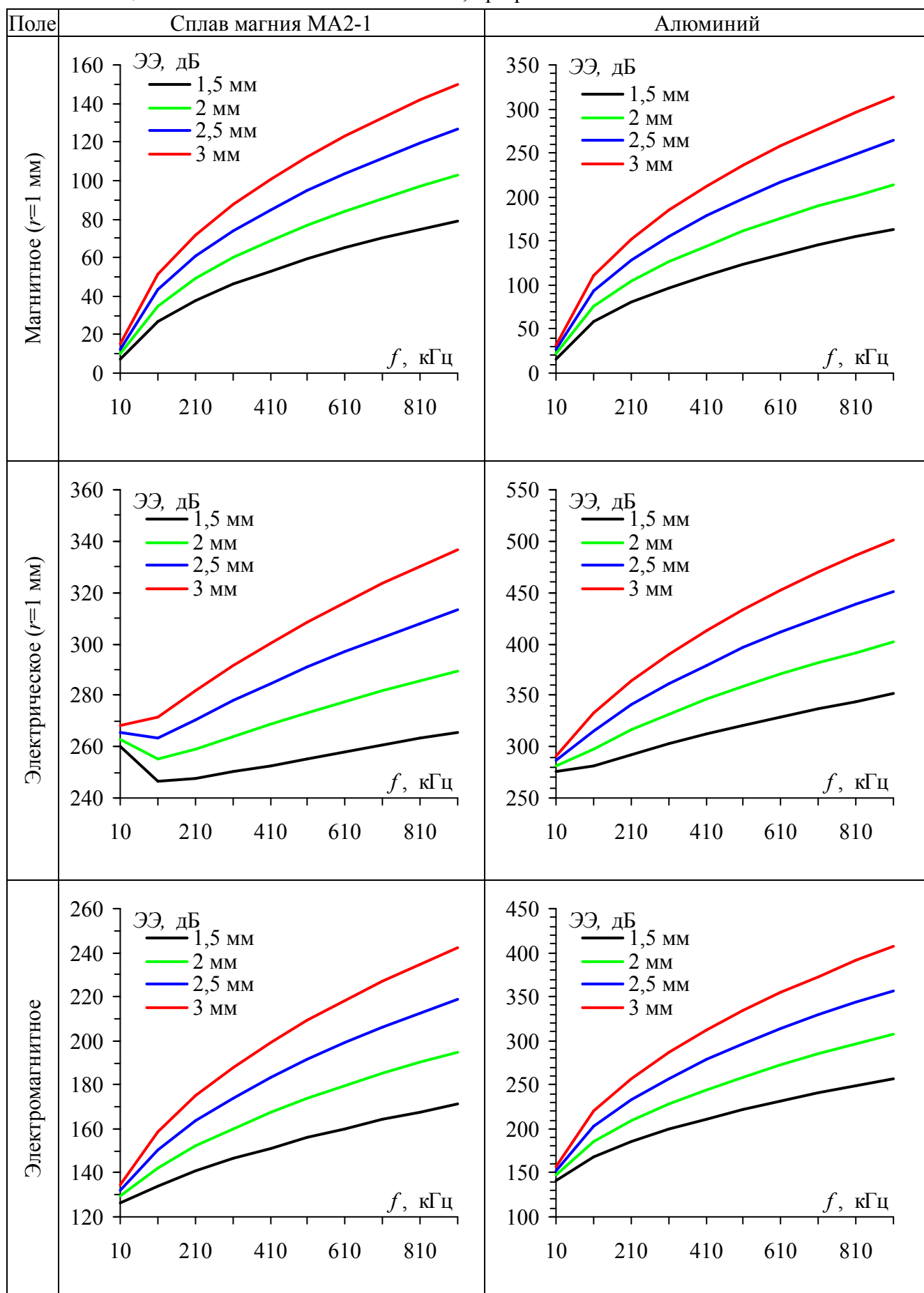
В настоящее время для экранирования используют разные типы металлов, из которых для КА особый интерес представляют легкие металлы и их сплавы [205]. Среди них выбраны широко применяемые алюминий ($\sigma=37 \cdot 10^6$, См/м) и сплав магния МА2-1 ($\sigma=8,3 \cdot 10^6$ См/м). Толщина экрана t , в соответствии с реальными размерами, используемыми в БА КА, варьировалась от 1,5 мм до 3,0 мм с шагом 0,5 мм. Расстояние r от источника помех до экрана, для оценки разных реальных вариантов, выбрано равным 1, 10, 100, 1000 мм. Частота источника помех варьировалась от 10 кГц до 18 ГГц в трёх диапазонах частот: 10, 20, ..., 1000 кГц; 10, 20, ..., 1000 МГц, 1, 2, ..., 18 ГГц.

Моделирование проводилось при нормальном направлении падения электромагнитного, электрического и магнитного полей. Получено 432 частотных зависимости ЭЭ. Для всех параметров на частотах выше 1 МГц ЭЭ довольно велика и составляет сотни децибел, значительно увеличиваясь с дальнейшим ростом частоты и поэтому далее не представлена. С уменьшением частоты ЭЭ снижается, и поэтому для оценки наихудшего случая значения ЭЭ приведены в таблице 2.1, а частотные зависимости для обоих металлов разной толщины при минимальном расстоянии – в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Оценки ЭЭ пластины, дБ

f , Гц	t , мм	r , мм	Электрическое поле		Магнитное поле		Электромагнитное поле	
			Al	МА2-1	Al	МА2-1	Al	МА2-1
10^4	1,5	1	275	260	16	8	142	126
		10	255	240	29	15		
		100	235	220	48	33		
	2	1	281	263	22	10	147	129
		10	261	243	35	18		
		100	241	223	54	36		
	2,5	1	286	266	27	13	152	132
		10	266	246	40	20		
		100	246	226	59	39		
	3	1	291	268	32	15	158	135
		10	271	248	45	23		
		100	251	228	64	41		
10^6	1,5	1	357	268	171	83	264	174
		10	337	248	190	101		
		100	317	228	210	121		
	2	1	410	293	224	108	316	199
		10	390	273	243	126		
		100	370	253	263	146		
	2,5	1	462	318	276	133	369	224
		10	442	298	295	151		
		100	422	278	315	171		
	3	1	515	343	329	157	421	249
		10	495	323	348	176		
		100	475	303	368	195		

Как видно из таблицы 2.1, ЭЭ минимальна вблизи частот 10 кГц. Причем для ЭМП она остаётся довольно высокой, но переход от алюминия к сплаву магния уменьшает ЭЭ на 16–23 дБ с ростом толщины. Для электрического поля ЭЭ значительно выше, несмотря на её уменьшение пропорционально расстоянию, а переход от алюминия к сплаву магния уменьшает ЭЭ на ту же разницу, что и для электромагнитного поля. Наименьшее значение имеет ЭЭ магнитного поля, причем переход от алюминия к сплаву магния уменьшает ЭЭ на 8–23 дБ с ростом толщины и расстояния. Из таблицы 2.2 можно сделать количественные оценки для наихудшего случая. Примечательно, что для электрического поля появляется низкочастотный участок спада ЭЭ с ростом частоты из-за резкого ухудшения удельной проводимости сплава магния по сравнению с алюминием. Однако значение ЭЭ остается довольно большим.

Таблица 2.2 – Частотные зависимости ЭЭ, при разных t 

Для оценки возможности нежелательных влияний с одной стороны блока САН на другую полезна оценка ЭЭ металлического основания ПП, аппроксимированного сплошной бесконечной пластиной. Конструкция блока имеет внутреннее металлическое основание ПП, представляющее собой металлическую пластину, которая расположена посередине корпуса, и предназначена для жесткости конструкции и эффективного отвода тепла от вторичных источников питания. Также блок имеет крышку, представляющая собой металлическую пластину, которая закрывает рамку корпуса. Вычислены (таблица 2.3) частотные зависимости ЭЭ электрического, магнитного и электромагнитного полей в системе TALGAT для пластины из сплава магния МА2-1 толщиной 10 мм на расстоянии 1–10 мм от рецептора до пластины, имитирующей рамку основания (рисунок 2.1а) и крышку корпуса (рисунок 2.1б) толщиной 2 мм на расстоянии 1, 10, 100, 1000 мм, при ортогональном падении на плоский однородный металлический экран ЭМВ от источника помех, распространяющейся вдоль оси y . Частота источника помех варьировалась от 1 Гц до 1 МГц.

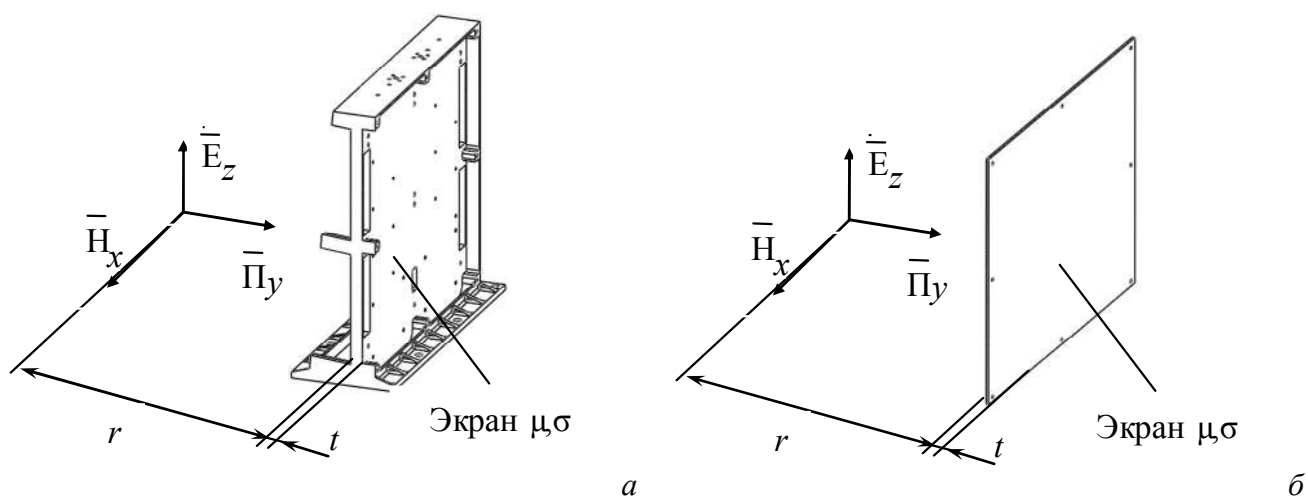
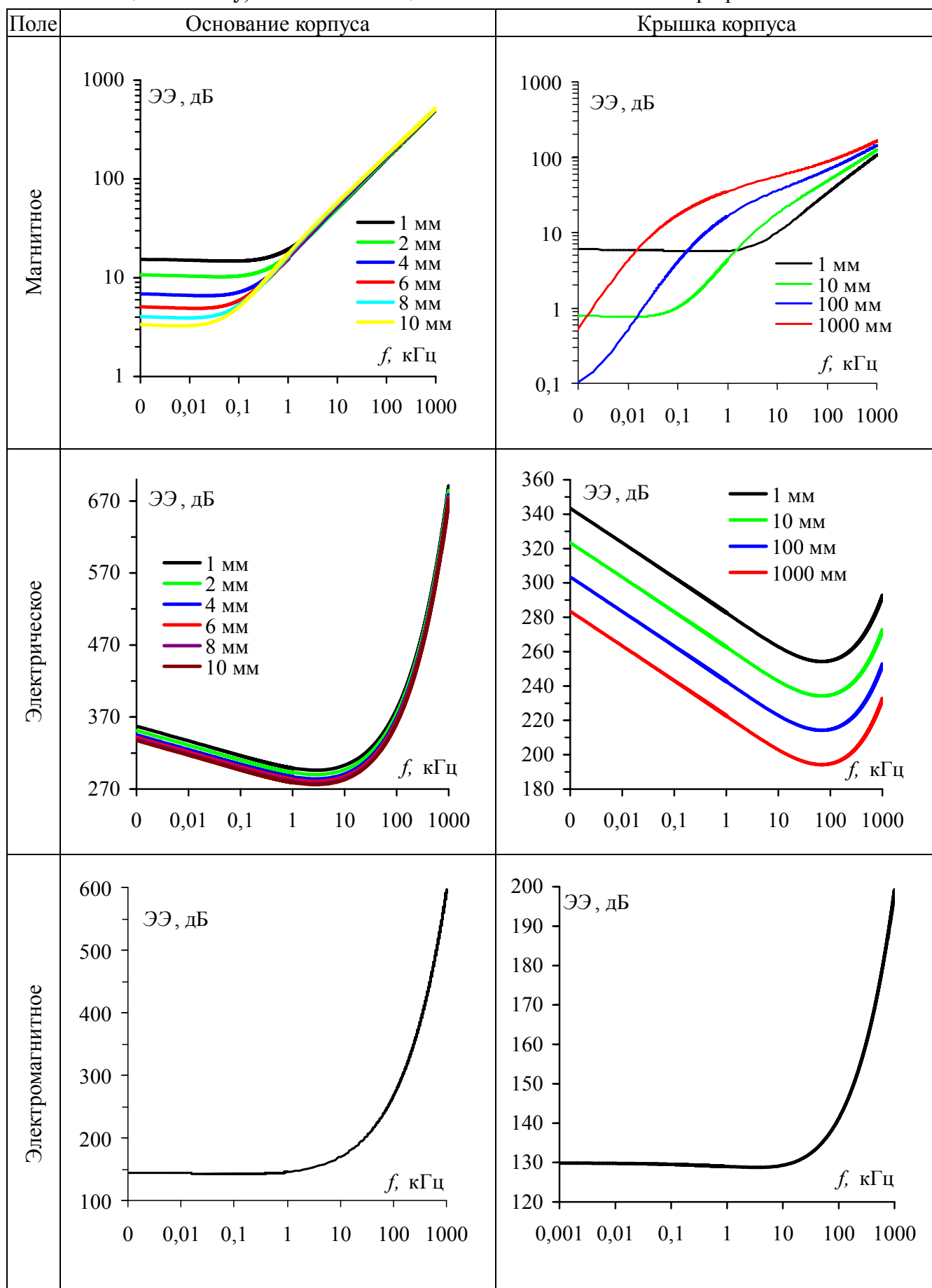


Рисунок 2.1 – Падение плоской ЭМВ на основание (а) и крышку (б) корпуса, моделируемые плоским однородным металлическим экраном

При падении плоской ЭМВ на основание рамки корпуса ЭЭ, для ЭМП (таблица 2.3) в диапазоне частот 1–1000 Гц составляет 143 дБ. В диапазоне частот 1–10 кГц ЭЭ возрастает до значения 170 дБ. В диапазоне частот 0,01–1 МГц ЭЭ продолжает расти, достигая значения 600 дБ. Таким образом, ЭЭ ЭМП довольно высока.

Таблица 2.3 – ЭЭ(f) пластиной толщиной 2 мм из сплава магния при разных r 

Для магнитного поля в диапазоне частот 1–100 Гц ЭЭ очень низка и слабо зависит от частоты. По мере удаления источника от пластины с 1 до 10 мм ЭЭ снижается с 15 до 3–5 дБ, при этом слабо убывающая зависимость становится возрастающей за счет слабо выраженного минимума в начале диапазона. В диапазоне частот 0,1–10 кГц, зависимости ЭЭ возрастают, но перекрещиваются так, что на частотах выше 5 кГц ЭЭ при малых расстояниях хуже, чем для больших. С ростом частоты и расстояния ЭЭ повышается до 55 дБ при $r=10$ мм на частоте 10 кГц. В диапазоне частот 0,01–1 МГц ЭЭ монотонно возрастает до 500 дБ. Таким образом, ЭЭ магнитного поля очень низка на низких частотах, а в диапазоне нескольких килогерц чувствительность ЭЭ к изменению расстояния до источника меняет свой знак.

Для электрического поля в диапазоне частот 1–100 Гц ЭЭ монотонно убывает до 300 дБ вблизи (1 мм) экрана и 320 дБ – в удалении (10 мм). В диапазоне частот 0,1–10 кГц ЭЭ резко убывает для всех расстояний до частоты 2,5 кГц, имея наихудшее значение 260 дБ при $r=1$ мм. На частотах выше 2,5 кГц ЭЭ слабо возрастает (на 1–3 дБ) для всех расстояний. В диапазоне частот 0,01–1 МГц ЭЭ монотонно возрастает до 700 дБ. Таким образом, ЭЭ ЭМП довольно высока, но имеет минимум на частоте 2,5 кГц.

При падении на крышку корпуса плоской ЭМВ ЭЭ ЭМП довольно высока и имеет слабо выраженный минимум на частоте 3 кГц, после которого ЭЭ монотонно возрастает до значения 200 дБ на частоте 1 МГц.

Для магнитного поля в диапазоне частот 1–100 Гц ЭЭ очень низка (0–6 дБ) и слабо зависит от частоты для всех расстояний, кроме самого удаленного (1000 мм), на котором монотонно возрастает до 18 дБ. В диапазоне частот 0,1–10 кГц значение ЭЭ слабо зависит (6–8 дБ) от частоты на расстоянии вблизи пластины (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 частот 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). Таким образом, ЭЭ магнитного поля для пластины толщиной 2 мм из сплава магния МА2-1 очень мала на низких частотах, что может потребовать принятия дополнительных мер по её повышению. Примечательна различная зависимость ЭЭ от расстояния на низких и более высоких частотах.

Для электрического поля ЭЭ высока, хотя и убывает одинаково (примерно на 80 дБ) для всех расстояний до частоты 50 кГц, на которой принимает минимальное значение (255 дБ при $r=1$ мм и 195 дБ при $r=1000$ мм). На частотах от 50 кГц до 1 МГц значение ЭЭ линейно возрастает примерно на 30–40 дБ. Таким образом, для электрического поля ЭЭ довольно высока, но имеет минимум.

В диапазоне частот 1–1000 МГц (графики не показаны) значение ЭЭ электромагнитного, электрического и магнитного поля довольно высока и возрастает на 100–500 дБ на каждые 100 МГц для всех расстояний.

2.2 Корпус с апертурой

2.2.1 Аналитическая модель для вычисления эффективности экранирования прямоугольным корпусом с апертурой

Особенность комбинированного метода, описанного в гл. 1, заключается в учете коэффициента связи между корпусом и апертурой, что позволяет получить частотную зависимость ЭЭ с произвольным расположением апертуры в стенке корпуса со стороны падения плоской ЭМВ.

На основе интегрального уравнения (1.5) получено аналитическое выражение (2.1) коэффициента связи апертуры с корпусом, при условии режима распространения волны TE_{10} в волноводе [206]. Выражение (2.1) используется совместно с выражениями (1.1), (1.2), (1.4), (1.6)–(1.12), (1.14), (1.16).

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

где X, Y – координаты центра апертуры; a – ширина стенки корпуса; l, w – ширина и высота апертуры в стенке корпуса; коэффициент $\beta = (X - Y)/l - 0,5$. Значения начала апертуры x_0 и y_0 выражены через $X-l/2$ и $Y-w/2$ соответственно.

В программе TALGAT реализованы две аналитические модели [207, 208]. Первая содержит выражения из гл. 1 согласно [68], вторая – выражения из [72] с учетом (2.1). Последняя модель позволяет выполнить быструю оценку ЭЭ корпусом с апертурой в стенке при её произвольном расположении. Результаты вычисления ЭЭ с помощью полученной модели и описанных (см. главу 1) моделей [68, 72], а также программы CST MWS представлены на рисунке 2.2. В качестве анализируемой структуры выбран корпус с геометрическими параметрами $a=d=300$ мм, $b=120$ мм и расположенной в центре апертурой $w=l=80$ мм и $w=40$ мм, $l=160$ мм. Время вычисления в программе MathCad для 2000 точек, согласно модели из [72] составило 16,335 с, а с учетом (2.1) – 0,21 с (ускорение порядка 77 раз).

С помощью (2.1) вычислены частотные зависимости ЭЭ корпусом (для точки в центре корпуса) с различным (в углу, центре и сверху) расположением апертуры в стенке корпуса при падении на неё плоской ЭМВ. При помощи модели из [72], выражения (2.1), а также систем

TALGAT (реализующей метод [68]) [209] и CST MWS (электродинамическое моделирование) выполнено сравнение частотных зависимостей ЭЭ корпусом размерами $a=d=300$ мм, $b=120$ мм, с толщиной стенок $t=1$ мм и апертурой $w=l=80$ мм (рисунок 2.2). Результаты, полученные по (2.1) при $w=5$ мм, $l=100$ мм и расположении апертуры в разных местах, а также с помощью TALGAT и CST MWS (только при центральном расположении апертуры) представлены на рисунке 2.3.

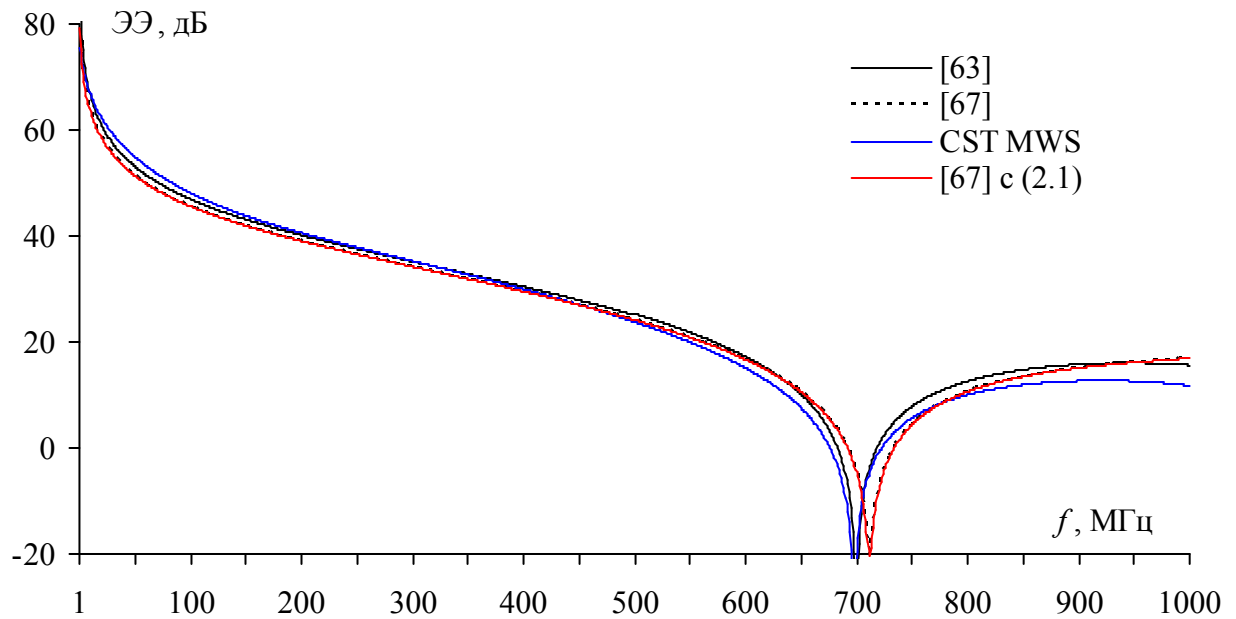


Рисунок 2.2 – Частотные зависимости ЭЭ прямоугольного корпуса с апертурой

Далее выполнены вычисления для массивов 1×1 , 2×2 , 4×4 , 6×6 апертур общей площадью $S=6400$ мм² при $a=d=b=300$ мм. Геометрические размеры апертур ($dv=dh$, мм) для массива: 1×1 – 80; 2×2 – 40; 4×4 – 20; 6×6 – 13,5. На рисунке 2.4 представлены полученные зависимости согласно (2.1) и в системе TALGAT (для массива 1×1 , расположенного в центре). Видно, что результаты согласуются. Разность значений не превышает 20 дБ.

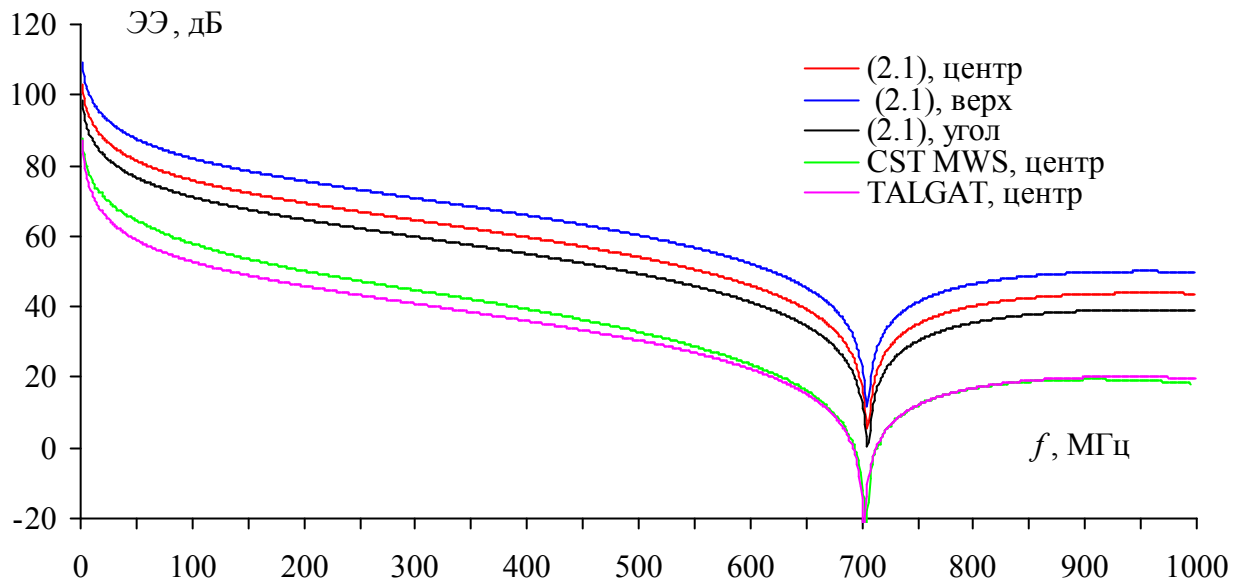


Рисунок 2.3 – Частотные зависимости ЭЭ корпусом при различном расположении апертуры

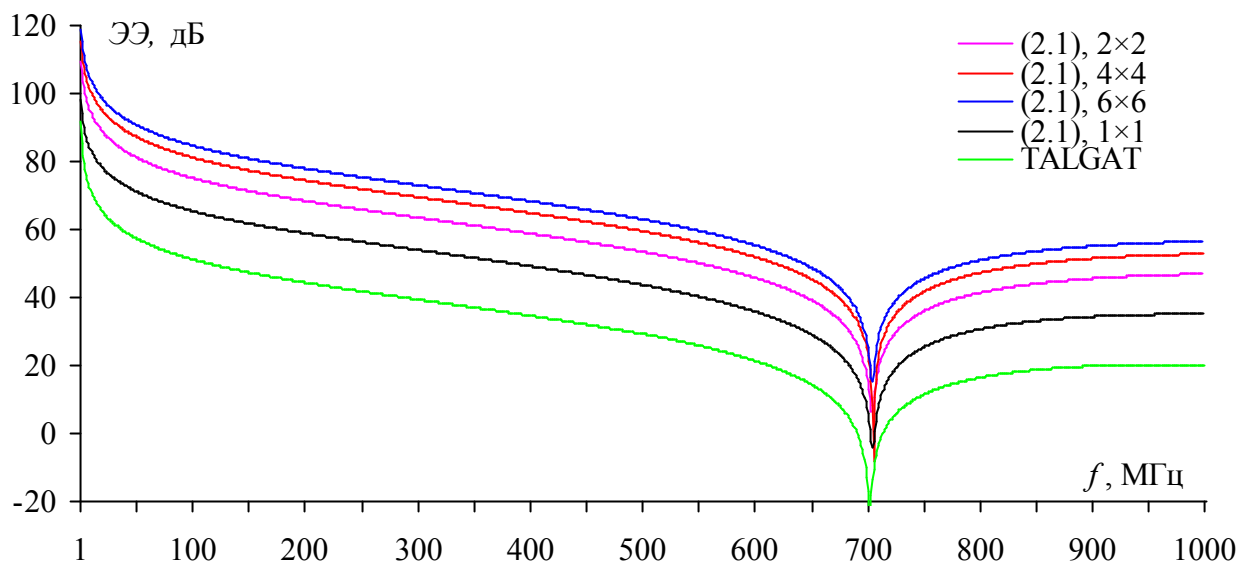


Рисунок 2.4 – Частотные зависимости ЭЭ массивов апертур

Таким образом, получено аналитическое выражение для вычисления коэффициента связи между корпусом и апертурой, с использованием которого выполнены вычисления частотных зависимостей ЭЭ корпусом с апертурой. Данные модели реализованы в программе TALGAT и ниже для сокращения будут описаны как TALGAT (1) и TALGAT (2), соответственно использующие уравнения [68] и [72] с учетом (2.1). Также, преимуществом данной модели является возможность реализации параметрической оптимизации по повышению ЭЭ корпусом, в заданном диапазоне частот, при оптимальном расположении апертуры. Поведение частотных зависимостей ЭЭ, полученных при помощи программы TALGAT и выражения (2.1), согласуется,

а различие составляет не более 20 дБ, что связано с неточностью вычисления сопротивления аперттуры Z_{ap} в приведенных [72] выражениях, которое значительно отличается от значения Z_{ap} в [68].

2.2.2 Корпус с пластиной и диэлектриком внутри аперттуры

Геометрическая модель корпуса $a=d=300$ мм, $b=120$ мм с апертурой $w=l=80\times 80$ мм, внутрь которой помещена металлическая пластина, а между её гранями и корпусом размещен диэлектрик (рисунок 2.5). Значение его относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) варировалось от 1 до 140. Расстояние x (ширина диэлектрика) между гранями металлической пластины толщиной равной толщине корпуса и корпусом принимало значения 0,1; 0,5; 1; 1,5 мм. В CST MWS построена геометрическая модель и выполнено вычисление ЭЭ (рисунок 2.6) в центре ($p=150$ мм) корпуса, при падении плоской ЭМВ со стороны стенки с аперттурой.

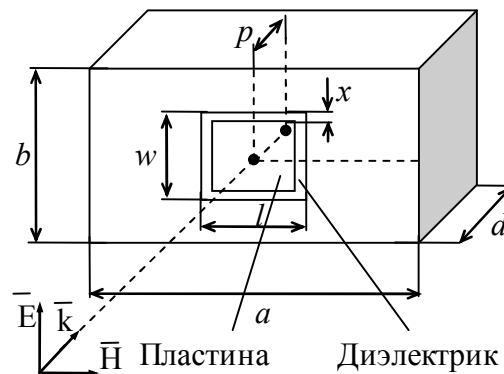


Рисунок 2.5 – Геометрическая модель корпуса
с металлической пластиной и диэлектриком внутри аперттуры

Из рисунка 2.6 видно, что при ϵ_r больше единицы появляются дополнительные резонансы в области низких частот. Значения ЭЭ на резонансных частотах повышается, с ростом количества резонансов аперттуры. На рисунке 2.7 приведена частотная зависимость резонансных частот от ϵ_r при разных её ширинах x .

Из рисунка 2.7 видно, что с увеличением ϵ_r материала частота резонанса щели экспоненциально снижается в область низких частот. При уменьшении ширины x щели (диэлектрика) частота резонансов имеет более выраженную зависимость.

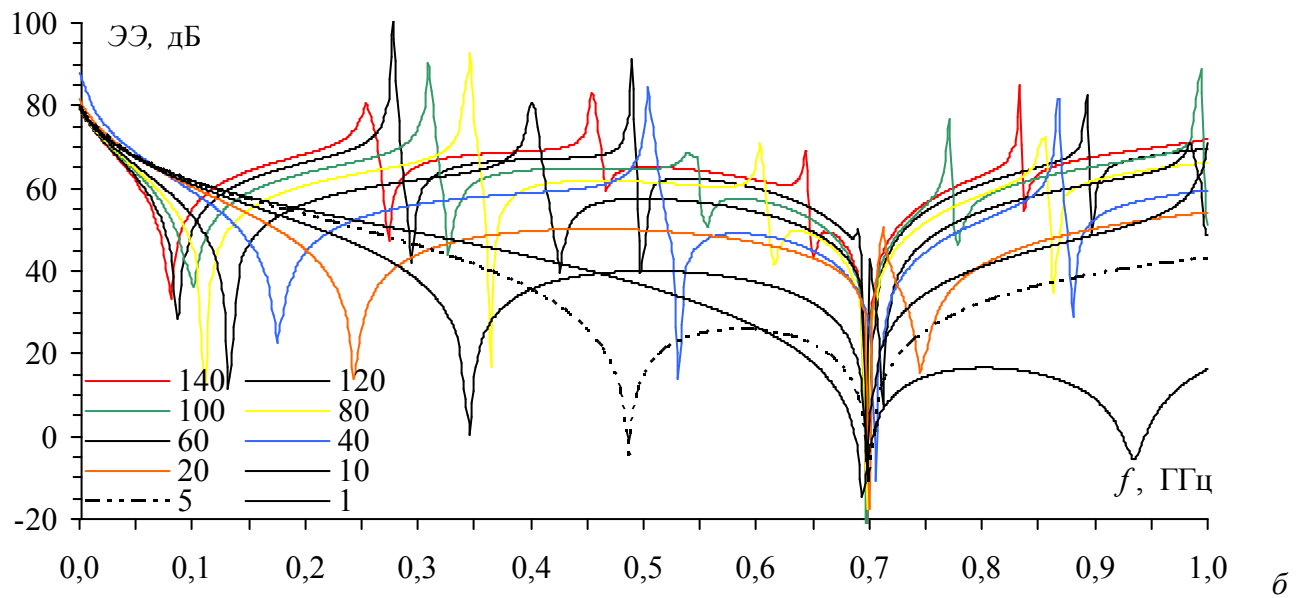
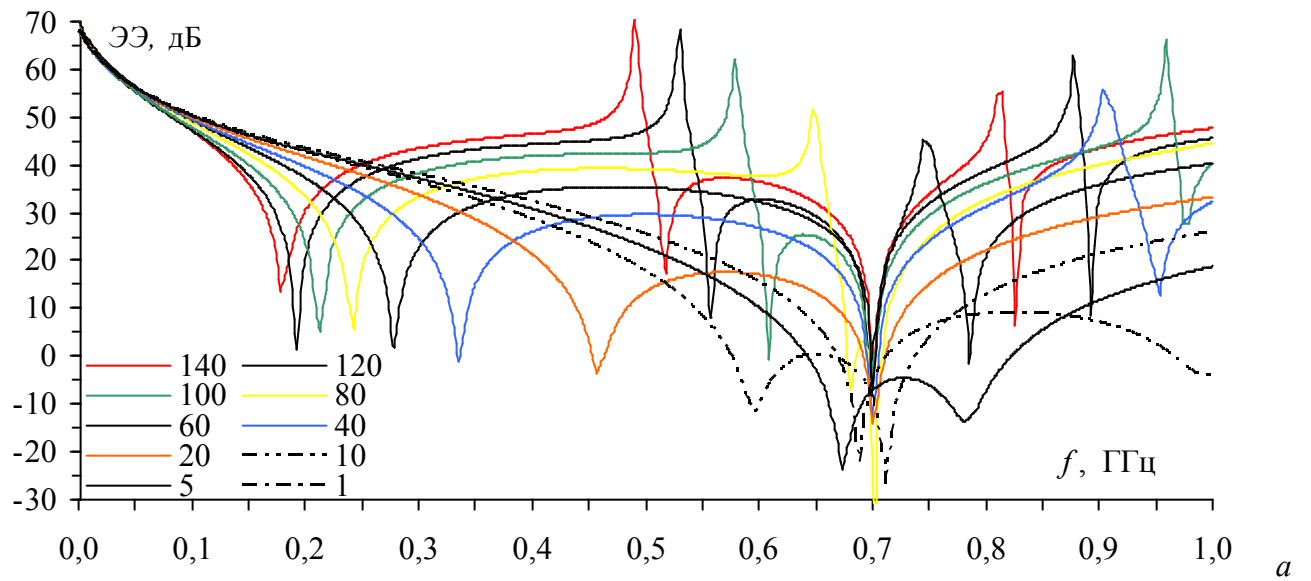


Рисунок 2.6 – Частотные зависимости ЭЭ в центре корпуса,
при ширине диэлектрика $x=0,1$ мм (а) и 1,5 мм (б) при разных ϵ_r

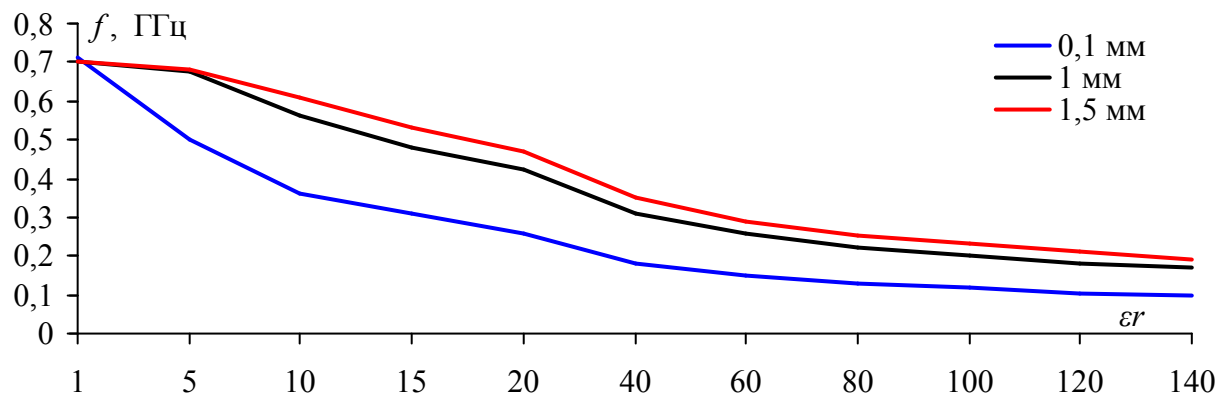


Рисунок 2.7 – Зависимости значений резонансных частот от ϵ_r при разных значениях x

Данное исследование может быть полезно в случае, когда металлический объект находится без электрической связи с корпусом, а между объектом и корпусом имеется диэлектрик с высоким значением ϵ_r . Например, резиновая прокладка ($\epsilon_r=5$) или лёд ($\epsilon_r=57,8$ на частоте $f=100$ Гц) образовавшийся, например, вследствие изменения климатических условий.

2.3 Корпус соединителя

Вычисление частотной зависимости ЭЭ корпуса соединителя СНП 339 (рисунок 2.8) проводилось для двух случаев, с полным раскрытием апертуры и при её перекрытии, в трех диапазонах частот $f_1=1\cdot 10^4$, $20\cdot 10^4$, ..., $1\cdot 10^6$ Гц; $f_2=1\cdot 10^6$, $1,1\cdot 10^6$, ..., $1\cdot 10^9$ Гц; $f_3=1\cdot 10^9$, $1,05\cdot 10^9$, ... $20\cdot 10^9$ Гц. Расстояние p от центра апертуры корпуса до точки наблюдения поля варьировалось от 1 мм до 20 мм с шагом 5 мм. Геометрическая модель (рисунок 2.9а) реального корпуса имеет раскрыв, соответствующий размерам узкой и широкой стенок корпуса. Предполагалось, что для увеличения ЭЭ корпусом соединителя необходимо перекрытие апертуры стенки корпуса со стороны ввода кабеля. Геометрическая модель корпуса с перекрытием апертуры [210] показана на рисунке 2.9б. Раскрыв апертуры w варьировался от 2 мм до 8 мм с шагом 1 мм.



а



б

Рисунок 2.8 – Соединитель типа СНП 339 в металлическом (а) и пластмассовом (б) корпусах

Для вычисления резонансных частот корпуса соединителя с внутренними размерами $a \times b \times d = 29,5 \times 9 \times 21,5$ мм с толщиной стенки $t = 0,5$ мм применена формула (2.2). Результаты вычислений в диапазоне частот до 20 ГГц представлены в таблице 2.4.

$$f_{i,j,k} = 0,5 \cdot c \cdot \sqrt{(i/a)^2 + (j/b)^2 + (k/d)^2}, \quad i, j, k = 0, 1, \dots \quad (2.2)$$

Таблица 2.4 – Резонансы корпуса соединителя СНП 339

i, j, k	$f_{i,j,k}$, ГГц	i, j, k	$f_{i,j,k}$, ГГц	i, j, k	$f_{i,j,k}$, ГГц	i, j, k	$f_{i,j,k}$, ГГц
1,0,0	5,081	2,0,1	12,33	3,0,1	16,76	0,1,1	19,99
0,0,1	6,972	0,0,2	13,94	2,0,2	17,25	1,1,1	20,06
1,0,1	8,627	1,0,2	14,84	0,1,0	18,74	2,1,0	21,32
2,0,0	10,16	3,0,0	15,24	1,1,0	19,41	2,1,1	22,43

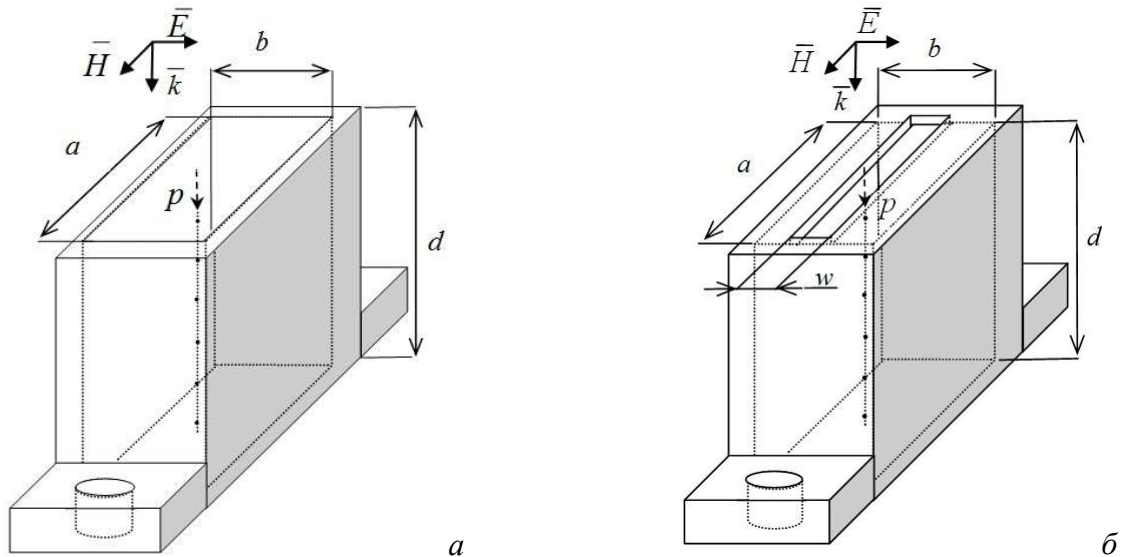


Рисунок 2.9 – Геометрическая модель корпуса соединителя СНП 339
с полным (а) и уменьшенным (б) раскрытиями щели

Далее вычислены частотные зависимости ЭЭ корпусом с теми же внутренними геометрическими размерами, с помощью модели [68], реализованной в программе TALGAT. Для корректного сравнения выполнены идентичные вычисления в программе CST MWS, с помощью МКЭ, без учета потерь. При оценке ЭЭ корпуса полагалось, что снизу корпуса (со стороны соединителя) имеется сплошная стенка. Для каждого из трех диапазонов получено по 5 зависимостей ЭЭ на разных расстояниях (p) с шагом 5 мм вглубь корпуса.

В результате сравнения частотных зависимостей ЭЭ, полученных разными методами (таблица 2.5), видно, что в диапазонах частот f_1 (10 кГц–1 МГц) и f_2 (1 МГц–1 ГГц) (рисунки 2.10а, б), при вычислении с использованием формулы (2.1) (TALGAT (2)), различие значений ЭЭ по сравнению с программой CST MWS не превышает 3 дБ, для всех точек наблюдения кроме самой дальней, на которой разность составляет 11,8 дБ. Различие значений, полученных с помощью TALGAT (1), по сравнению с программой CST MWS в диапазоне частот f_1 не превышает 14 дБ, а в диапазоне f_2 – 22,5 дБ, что значительно выше (около 12 дБ), чем при использовании TALGAT (2). В диапазоне частот f_3 (1 ГГц–20 ГГц) видно, что различие значений ЭЭ между TALGAT (2) и CST MWS сохраняется около 10–15 дБ до частоты первого резонанса, однако на частотах резонанса возрастает до 20 дБ. Различие значений ЭЭ, в диапазоне частот f_3 для TALGAT (1) и CST MWS возрастает до 35 дБ.

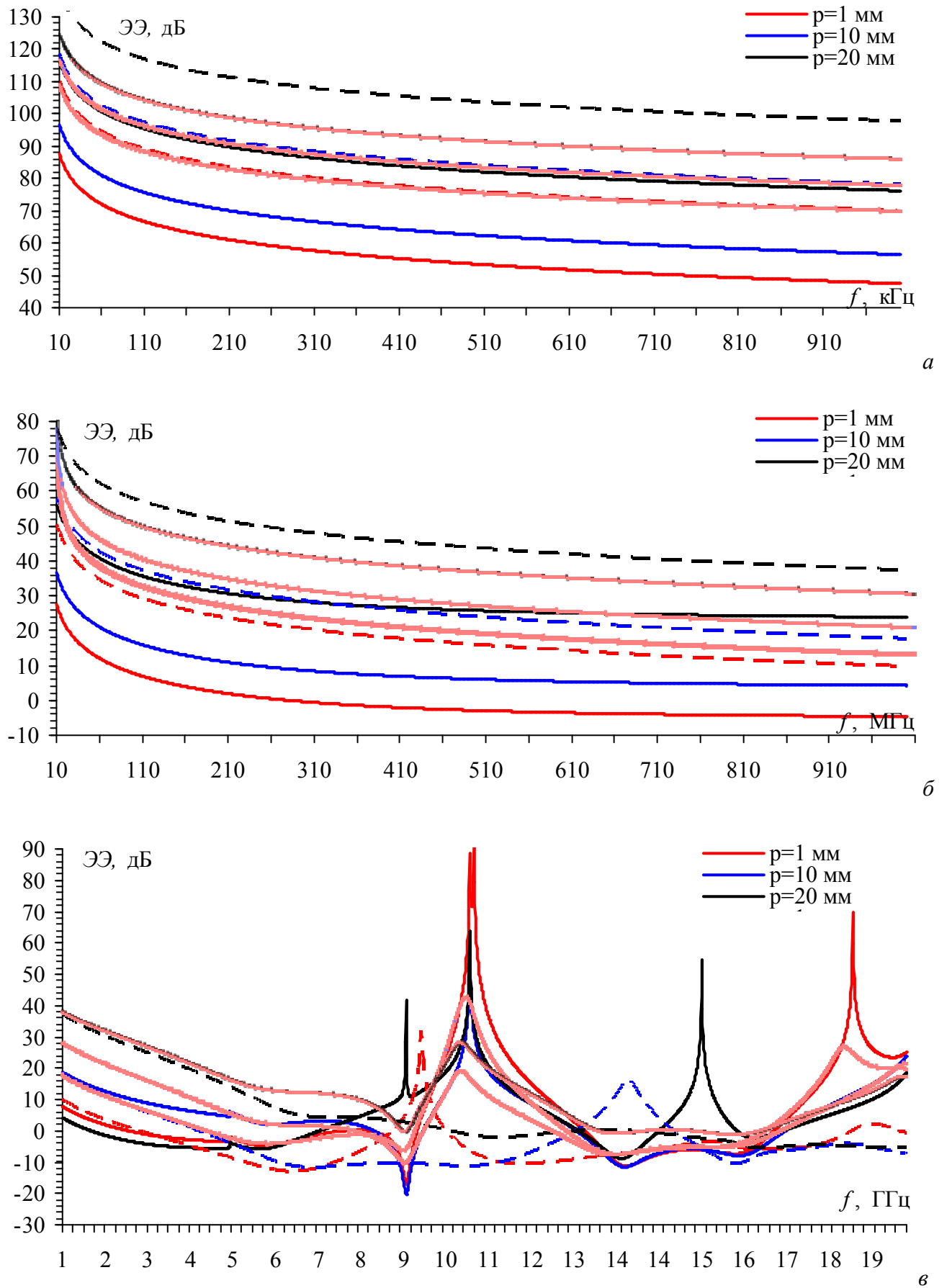


Рисунок 2.10 – Частотные зависимости ЭЭ корпусом соединителя в диапазонах частот f_1 (*a*), f_2 (*б*), f_3 (*в*), при изменении расстояния p (— TALGAT (1), --- CST MWS, ---- TALGAT (2))

Таблица 2.5 – Значения ЭЭ, дБ для корпуса соединителя

f , МГц	1		1000	
p , мм	1	20	1	20
TALGAT (1)	–4,6	23,9	47,5	76,2
CST MWS	9,8	37	70	97,8
TALGAT (2)	12	30,5	69,9	86

Таким образом, различие вычисленных значений между TALGAT (2) и CST MWS мало по сравнению с TALGAT (1). Однако результаты электродинамического моделирования могут быть также некорректны, а результаты эксперимента для данного вида корпуса соединителя проводить нецелесообразно, поскольку он имеет малые габариты, а размещение внутри корпуса соединителя датчиков E -поля может внести искажения в результаты измерений. Поэтому для рассмотрения наихудшего случая для корпуса соединителя для дальнейших вычислений выбран TALGAT (1). Также, оценивалось среднее время вычислений каждой частотной зависимости для диапазонов частот f_1 и f_2 (количество точек – 1000), которое составило в TALGAT (1) и TALGAT (2) – 4 с, CST MWS – 1864 с. Ускорение составило 466 раз [211, 212].

В диапазоне частот f_1 (10 кГц–1 МГц) ЭЭ монотонно убывает (рисунок 2.10а). Вблизи раскрыва ($p = 1$ мм), ЭЭ – не менее 45 дБ (TALGAT (1)). С увеличением расстояния на каждые 5 мм вглубь корпуса ЭЭ возрастает на 4–6 дБ до $p = 15$ мм (на графиках частотные зависимости ЭЭ при $p=5$ и 15 мм не показаны). В самой удаленной точке $p = 20$ мм на частоте 1 МГц ЭЭ составляет не менее 80 дБ, что на 35 дБ выше, чем возле раскрыва корпуса. В диапазоне частот f_2 (1 МГц–1 ГГц) ЭЭ продолжает монотонно убывать (рисунок 2.10б) и снижается на частоте 1 ГГц вблизи раскрыва корпуса до уровня 0 дБ, а в самой удаленной точке – до уровня минус 6 дБ. В диапазоне частот f_3 (1–20 ГГц) (рисунок 2.10в) ЭЭ монотонно убывает, но лишь до частоты первого резонанса корпуса 5,085 ГГц. На этой частоте вблизи раскрыва ЭЭ имеет значение минус 6 дБ. Наихудшее значение ЭЭ корпуса соединителя составляет минус 22 дБ на частоте 9 ГГц, близкой к частоте резонанса 8,6 ГГц в центре корпуса. На частоте резонанса 10,17 ГГц, ЭЭ увеличивается до 75 дБ для всех расстояний p . На более высоких резонансных частотах ЭЭ как отрицательна, так и положительна и не совпадает по частотам при разных расстояниях от раскрыва корпуса до точки наблюдения. Для $p = 15$ мм примечателен довольно широкий диапазон частот (13–17 ГГц), в котором ЭЭ низка: от 0 до минус 10 дБ.

Результаты вычисления значений ЭЭ при $w = 2$ –8 мм, для расстояний p равных 1 мм (возле щели) и 10 мм (в середине корпуса) приведены на рисунках 2.11, 2.12 соответственно.

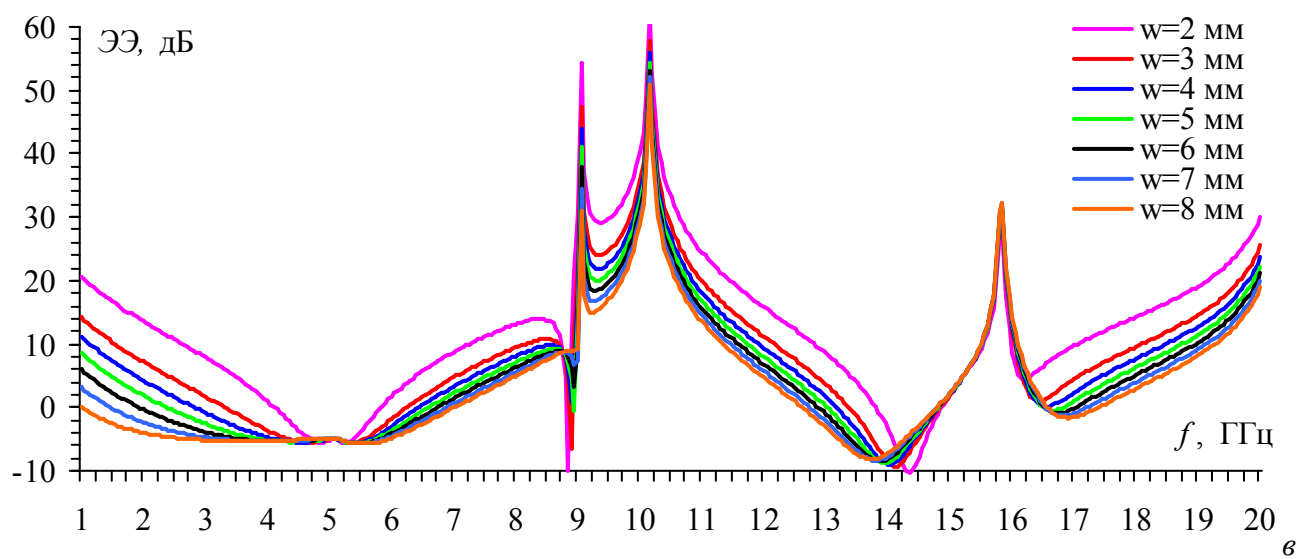
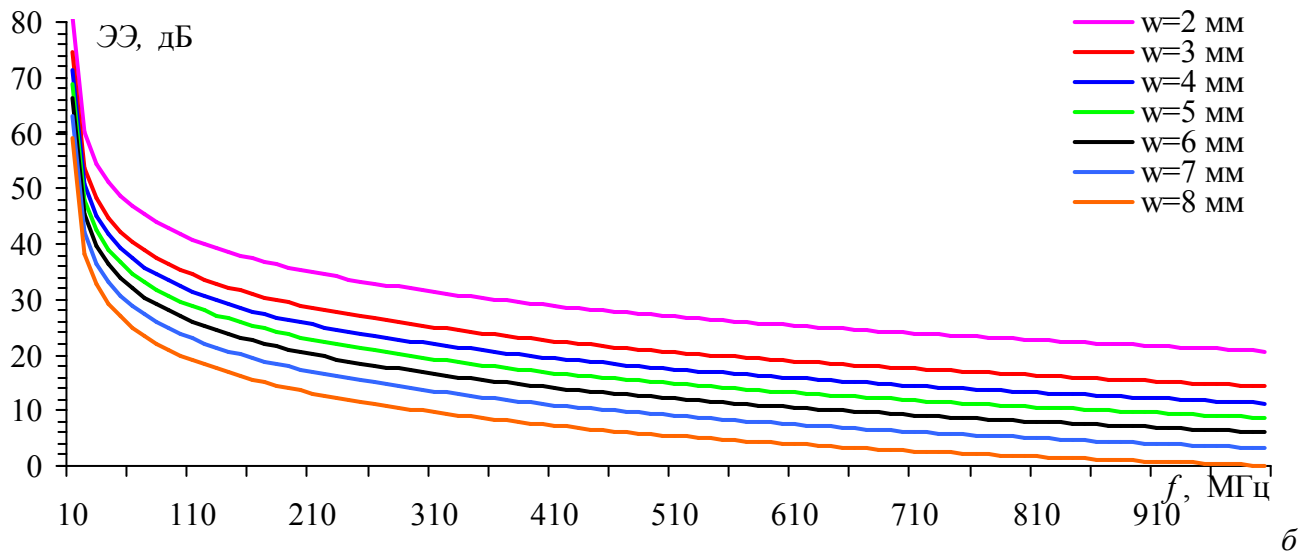
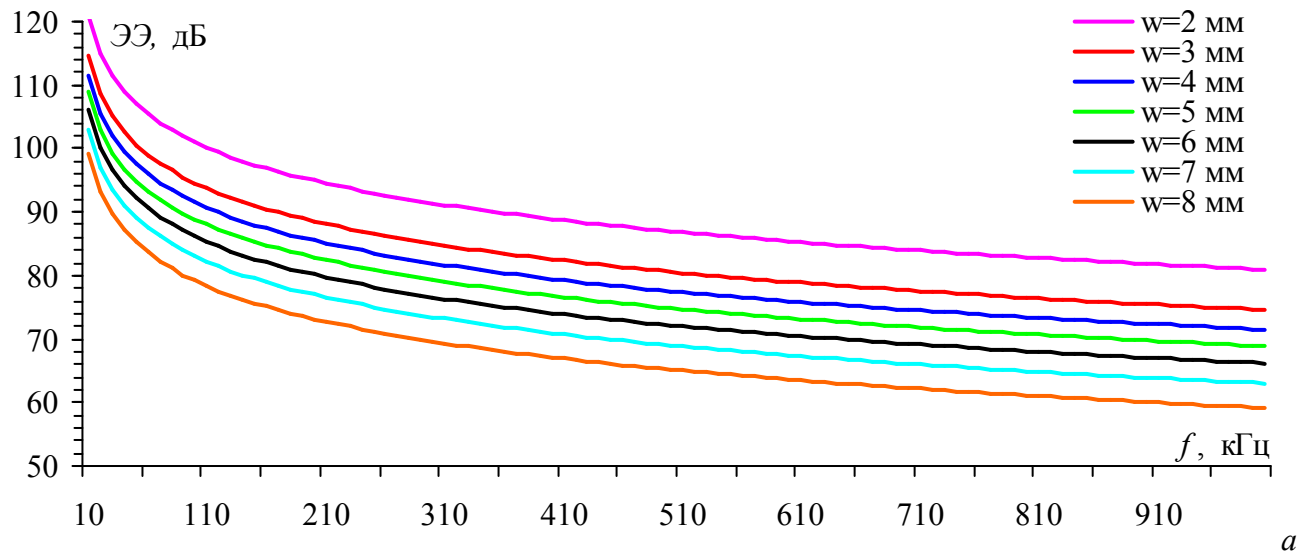


Рисунок 2.11 – Частотные зависимости ЭЭ корпуса соединителя
в диапазонах частот f_1 (а), f_2 (б), f_3 (в), для $w=2, 3, \dots, 8$ мм, при $p=1$ мм

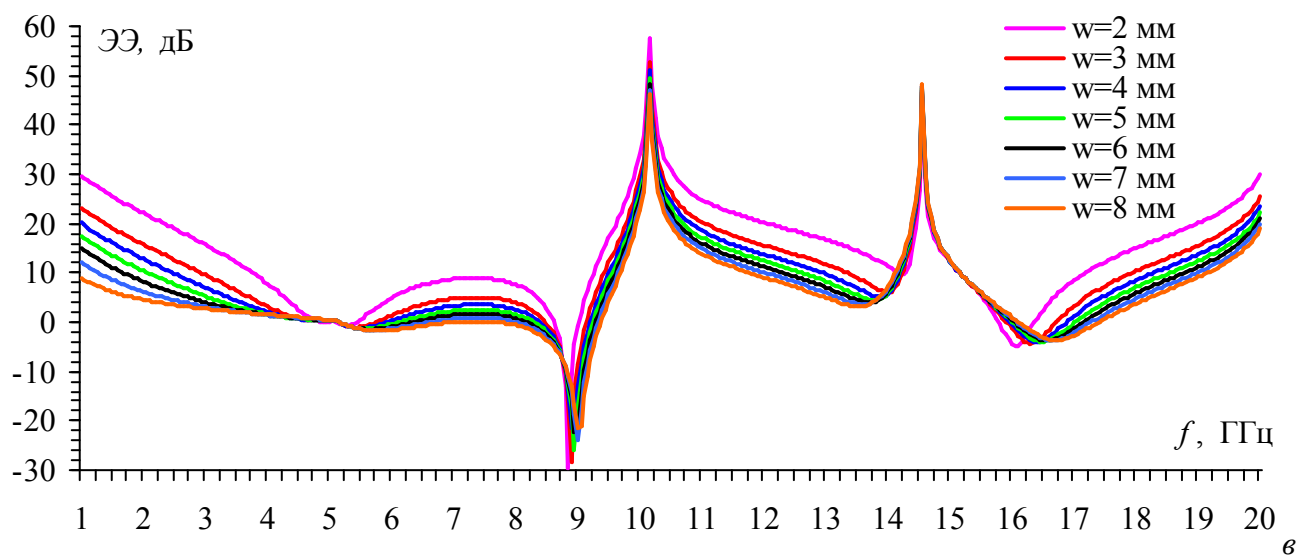
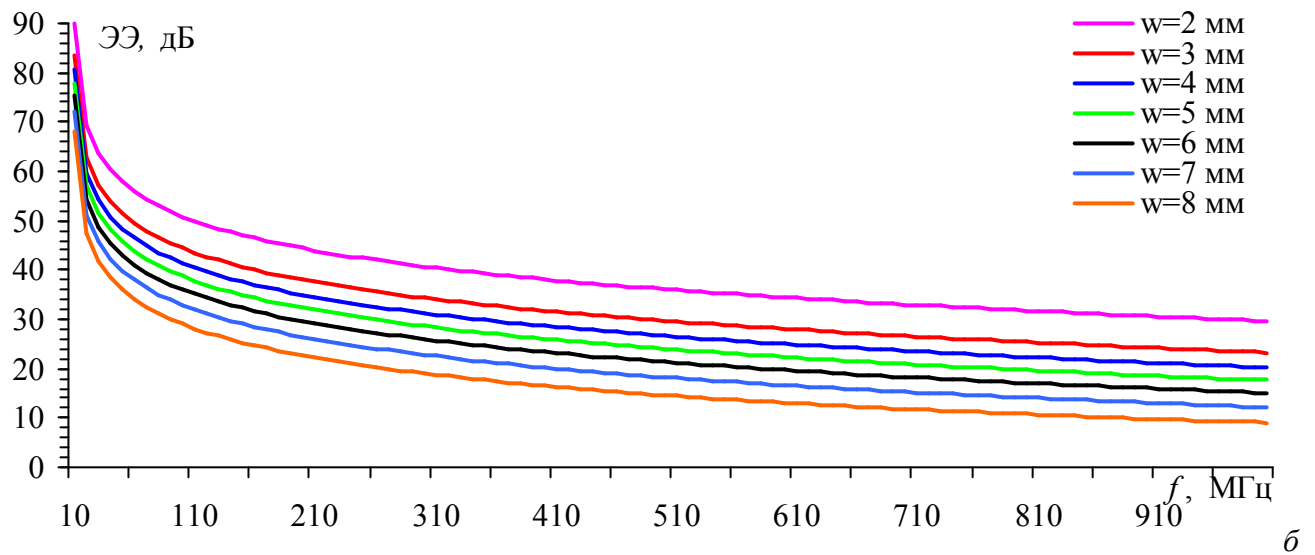
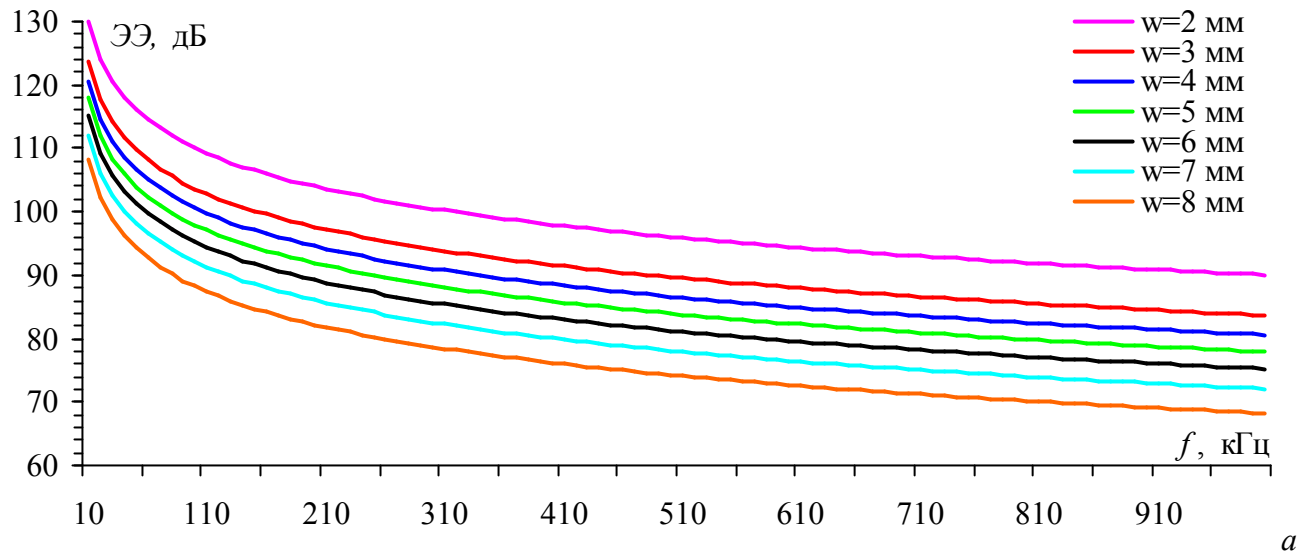


Рисунок 2.12 – Частотные зависимости ЭЭ корпуса соединителя
в диапазонах частот f_1 (a), f_2 (б), f_3 (в), для $w=2, 3, \dots, 8$ мм, при $p=10$ мм

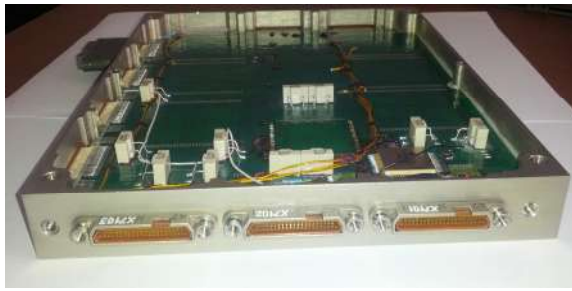
В диапазоне частот f_1 при полном раскрытии щели значение ЭЭ монотонно убывает до 59 дБ в начале (рисунок 2.11а) и 68 дБ в середине (рисунок 2.12а) корпуса, увеличиваясь при максимальном перекрытии на 22 дБ, с приростом 3–6 дБ на миллиметр перекрытия. В диапазоне частот f_2 значение ЭЭ продолжает монотонно убывать, увеличиваясь при максимальном перекрытии, по сравнению с полным раскрытием, на 20 дБ в начале и в середине корпуса. В начале корпуса на частоте 1 ГГц ЭЭ составляет 20 дБ при перекрытии щели и 0 дБ – при полном раскрытии (рисунок 2.11б).

В диапазоне частот f_3 значение ЭЭ продолжает монотонно убывать, но лишь до частоты первого (1, 0, 0) резонанса корпуса 5,081 ГГц (таблица 2.4). На этой частоте ЭЭ при полном раскрытии и при перекрытии щели имеет одинаковое значение – минус 6 дБ вблизи раскрытия (рисунок 2.11в) и 0 дБ – в середине корпуса (рисунок 2.12в), т.е. перекрытие щели не меняет значения ЭЭ. На более высоких частотах ЭЭ как положительна, так и отрицательна, при этом на частотах резонанса достигаются экстремумы ЭЭ. В промежутках между резонансными частотами значение ЭЭ при перекрытии щели увеличивается на 8–12 дБ в начале и середине корпуса. На частоте 9 ГГц (близкой к частоте резонанса 8,6 ГГц) в середине корпуса соединителя при $w=2$ мм наблюдается наихудшее значение ЭЭ – минус 33 дБ. С увеличением раскрытия щели на миллиметр значение ЭЭ возрастает на 3 дБ, при этом частота резонанса сдвигается в область более высоких частот. В области частоты резонанса 16,76 ГГц – значение ЭЭ в начале корпуса при максимальном перекрытии щели составляет 5 дБ и с увеличением раскрытия щели постепенно снижается до минус 2 дБ. При этом также наблюдается сдвиг резонансной частоты.

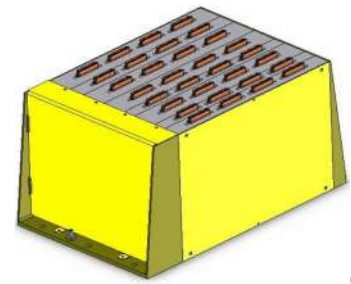
2.4 Унифицированный электронный модуль

УЭМ, как правило, представляет собой две печатные платы, припрессованные к разным сторонам металлического основания с перпендикулярными стенками по периметру (рисунок 2.13). Два соседних УЭМ образуют структуру, геометрическая модель которой представляет собой две половины корпуса, между которыми присутствует щель (рисунок 2.14а). Такое представление позволяет использовать для оценок ЭЭ простую аналитическую модель [68] TALGAT (1).

Моделирование проводилось для семи корпусов УЭМ [213] размерами $270 \times 140 \times 25$, $231 \times 174 \times b$, $178 \times 112 \times b$, где $b = 12, 14, 16$ мм. Точка наблюдения ЭЭ удалялась от центра апертуры вглубь корпуса. Реальная структура корпуса при моделировании заменялась двумя отдельными моделями с апертурой сверху (рисунок 2.14б) и сбоку (рисунок 2.14в). Воздействие – плоская ЭМВ частотой 10 кГц–2 ГГц с направлением падения волны и вектора напряженности электрического поля перпендикулярно центру апертуры с зазором $w=50$ мкм.

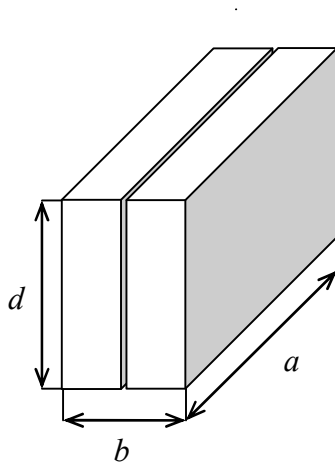


а

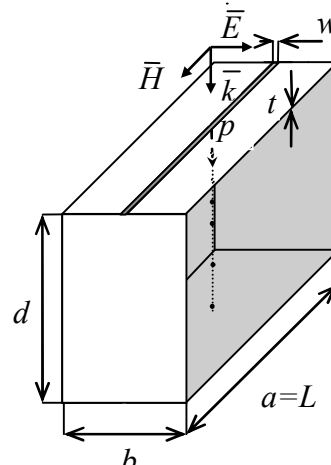


б

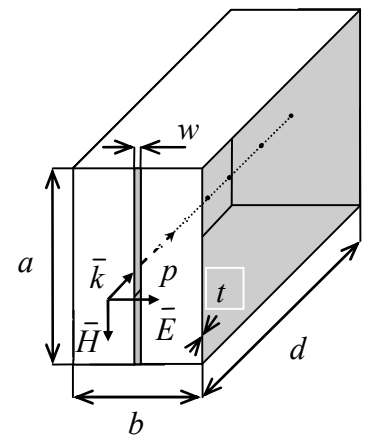
Рисунок 2.13 – УЭМ одиночный (а) и в составе прибора (б)



а



б



в

Рисунок 2.14 – Геометрические модели корпуса: реального (а), с апертурой сверху (б) и сбоку (в)

Резонансные частоты для всех размеров корпусов УЭМ вычислялись по (2.2). При этом учитывалась толщина каждой стенки корпуса $t=2$ мм. Результаты вычислений первых резонансов ($i, j, k = 1, 0, 0$) для трех разных корпусов сведены в таблицу 2.6. (При увеличении высоты корпуса b на каждые 2 мм частота первого резонанса не меняется, она также не зависит и от размера аперттуры, поскольку она обратно пропорциональна длине стенки корпуса с аперттурой). Видно, что частота первого резонанса находится в диапазоне 0,5–1,5 ГГц.

Таблица 2.6 – Частота (МГц) первого резонанса, для разных размеров корпусов УЭМ

Размеры УЭМ, мм	Щель сверху	Щель сбоку
270×140×25	564	1103
231×174×12	661	882
178×112×12	862	1389

Вычисления ЭЭ в TALGAT (1) показали, что в диапазоне частот до 1 МГц ЭЭ не менее 60 дБ для всех расстояний и размеров корпусов. Частотные зависимости для корпуса размером 270×140×25 приведены на рисунках 2.15, 2.16. В диапазоне частот 1 МГц–1 ГГц зависимость ЭЭ от частоты монотонно убывает до частоты первого резонанса при аперттуре сверху (рисунок 2.15а) и сбоку (рисунок 2.16а). Частота первого резонанса при аперттуре сбоку

сдвинута в область более высоких частот (рисунок 2.16б). На частоте первого резонанса вблизи апертуры ($p=1$ мм) ЭЭ для каждого размера корпуса одинакова и очень низка (минус 6 дБ). При углублении вглубь корпуса с шагом $p=25$ мм при апертуре сверху (рисунок 2.15а) и сбоку (рисунок 2.16а) ЭЭ увеличивается на 4–6 дБ и резко возрастает возле удаленной стенки корпуса.

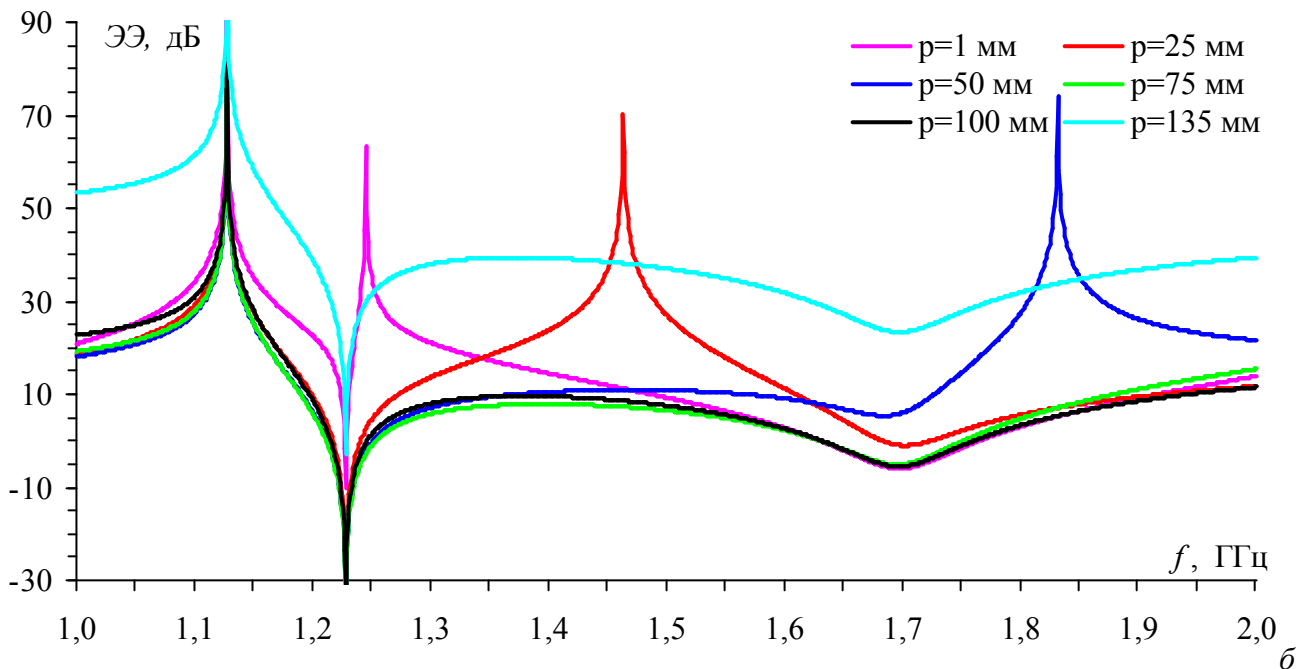
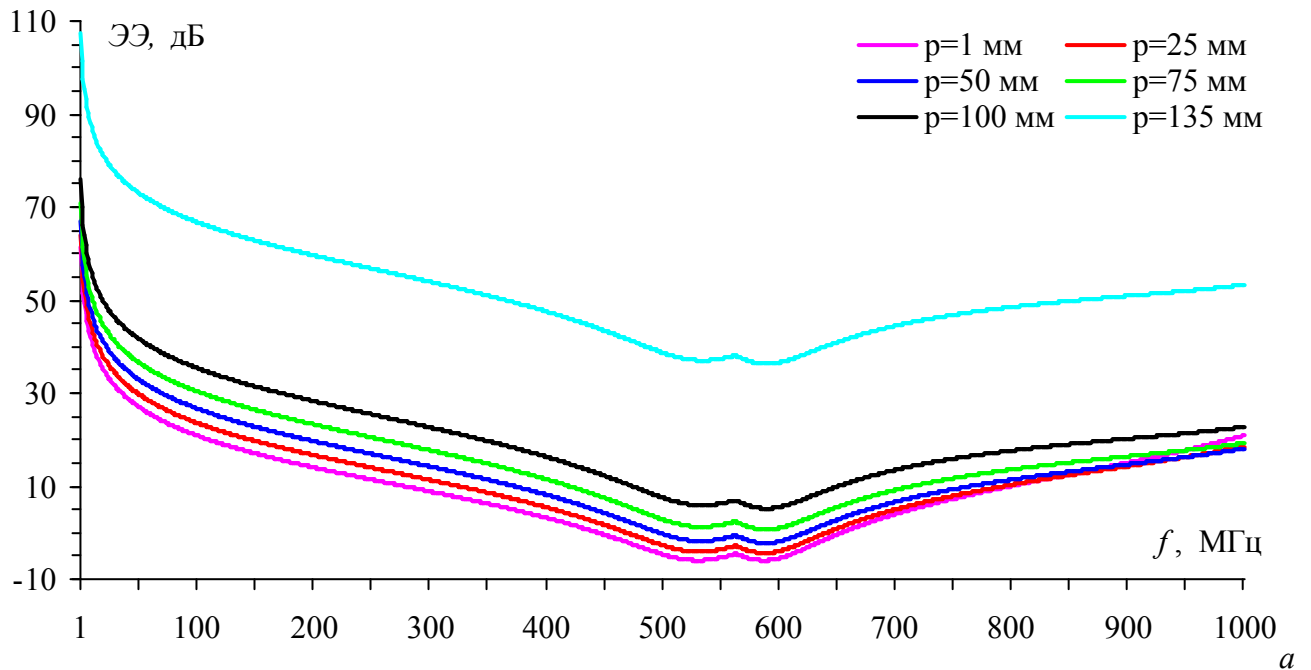


Рисунок 2.15 – ЭЭ корпуса $270 \times 140 \times 25$ при щели сверху в диапазоне 0,001–1 (а), 1–2 (б) ГГц

В диапазоне частот от 1 до 2 ГГц начинается область резонансов, где наблюдаются наихудшие значения ЭЭ: минус 20 дБ при апертуре сверху на частоте 1,23 ГГц в центре корпуса

$p=75$ мм (рисунок 2.15б); минус 26 дБ при апертуре сбоку на частоте 1,59 ГГц при $p=200$ мм и – 18 дБ на частоте 1,25 ГГц при $p=150$ мм (рисунок 2.16б).

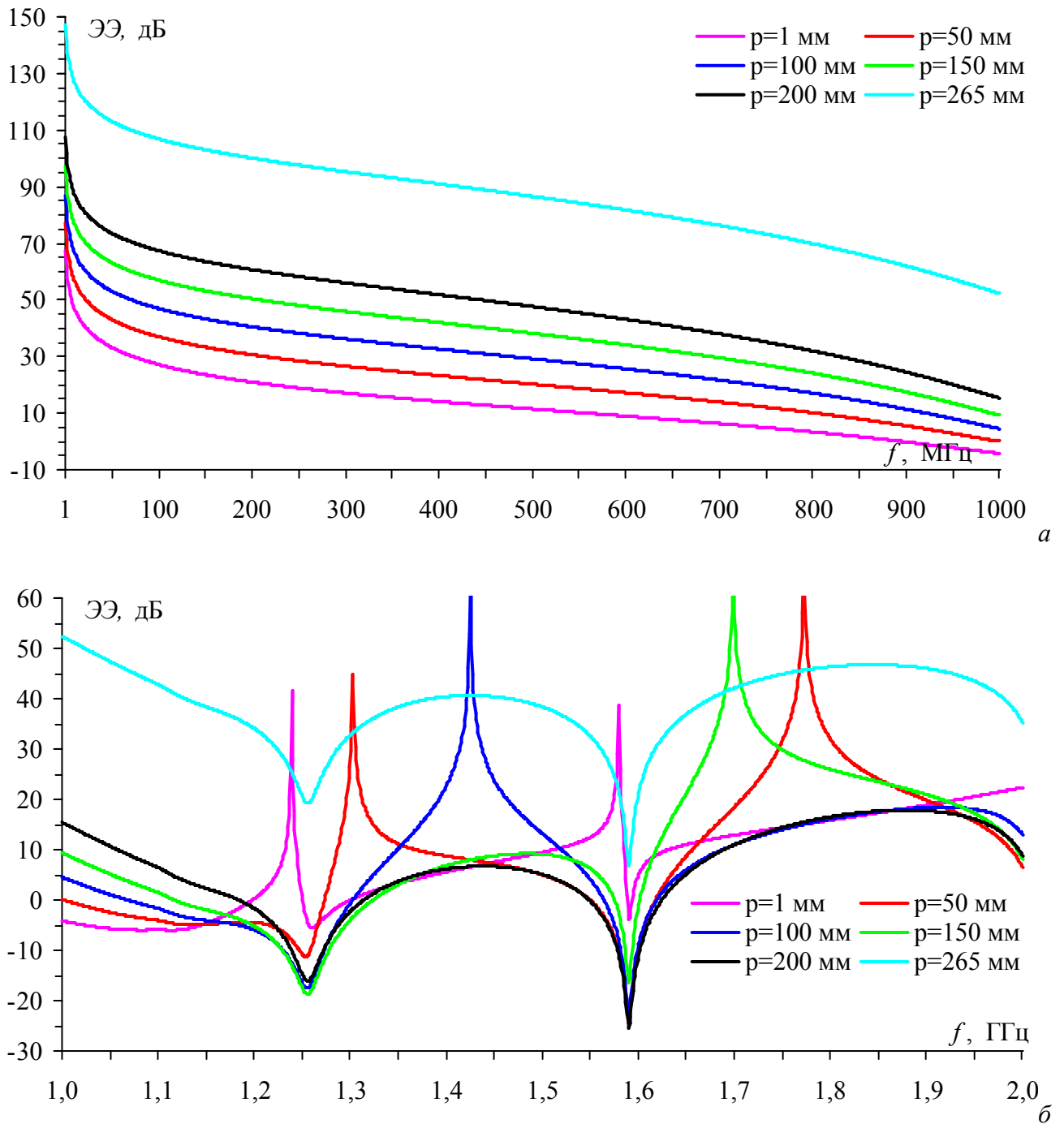


Рисунок 2.16 – ЭЭ корпуса 270×140×25 при щели сбоку в диапазоне 0,001–1 (а), 1–2 (б) ГГц

В таблице 2.7 приведены значения ЭЭ для семи размеров корпусов УЭМ для частот 10 кГц, 1 МГц, 1 ГГц. В диапазоне частот до 10 кГц ЭЭ не менее 100 дБ, а до 1 МГц – не менее 60 дБ для всех расстояний и размеров корпусов. Значение ЭЭ увеличивается на 4–6 дБ при изменении расстояния от апертуры на каждые 25 мм для каждого размера корпуса при апертуре

с обеих сторон, а в самой удаленной точке ЭЭ наиболее высока. Вблизи стенок корпуса на частоте 1 ГГц ЭЭ около нуля, а в самой удаленной точке на этой же частоте – выше 40 дБ.

Таблица 2.7 – Значения ЭЭ, дБ корпусов УЭМ разных размеров

Щель	f	p , мм	Размеры корпуса, мм								p , мм	270×140×25
			178×112× b			p , мм	231×174× b					
			$b=12$	$b=14$	$b=16$		$b=12$	$b=14$	$b=16$			
Сверху	10 кГц	1	104	104	104	1	101	102	102	1	101	
		25	108	108	108	25	104	105	105	25	104	
		50	112	113	113	50	107	108	108	50	107	
		75	118	118	119	75	111	111	111	75	111	
		100	131	131	132	100	114	115	115	100	116	
		107	149	149	150	169	153	153	153	135	147	
	1 МГц	1	64	64	64	1	61	61	61	1	61	
		25	68	68	68	25	64	65	65	25	64	
		50	72	73	73	50	67	68	68	50	67	
		75	78	78	79	75	71	71	71	75	71	
		100	91	91	92	100	74	75	75	100	76	
		107	109	109	110	169	113	113	113	135	107	
	1 ГГц	1	-1	0	0	1	13	13	13	1	21	
		25	1	1	1	25	8	9	9	25	19	
		50	3	4	4	50	6	7	7	50	18	
		75	8	8	8	75	6	6	6	75	19	
		100	20	20	20	100	7	7	7	100	22	
		107	38	38	39	169	42	42	43	135	53	
Сбоку	10 кГц	1	108	108	109	1	104	104	105	1	107	
		25	114	114	115	50	112	112	112	50	117	
		50	120	121	121	100	120	120	120	100	127	
		75	127	127	127	150	128	129	129	150	137	
		100	133	133	134	200	140	140	140	200	148	
		173	176	177	177	226	169	169	169	265	187	
	1 МГц	1	68	68	69	1	64	64	65	1	67	
		25	74	74	75	50	72	72	72	50	77	
		50	80	81	81	100	80	80	80	100	87	
		75	87	87	87	150	88	89	89	150	97	
		100	93	94	94	200	100	100	100	200	108	
		173	136	137	137	226	129	129	129	265	147	
	1 ГГц	1	2	3	3	1	1	1	1	1	-4	
		25	7	7	7	50	-2	-1	-1	50	0	
		50	11	11	11	100	-1	-1	-1	100	5	
		75	15	16	16	150	2	2	2	150	9	
		100	20	20	21	200	10	10	10	200	15	
		173	60	61	61	226	39	387	39	265	52	

Разработаны рекомендации по повышению ЭЭ корпусов и соединителя. Выполнение полного перекрытия апертуры корпуса УЭМ или соединителя типа СНП 339 актуально выполнять из легких материалов или их сплавов с повышенной стойкостью к постоянным

деформациям и высокой ЭЭ. При этом экранирующие конструкции должны быть установлены на конечном этапе сборки всего устройства.

Для повышения ЭЭ корпусом УЭМ можно использовать прокладки, выполненные на основе предложенных в аналитическом обзоре конструкторских решений, таких как: зубчатые [42] и пружинные прокладки [43, 44] из жесткого проводящего материала без внешнего покрытия, для контакта между двумя соприкасающимися в раскрыве щели УЭМ, а также экранирующие прокладки [46, 47], применяемые для экранирования межмодульных щелей в электронных модулях. На конечном этапе сборки всей конструкции целесообразно наложить на щель экранирующую ленту из фольги с высокой адгезией. Следует обеспечить электрический контакт ленты с корпусом УЭМ. Контакт может быть выполнен при помощи пайки припоем с каждой из сторон УЭМ. Отверстия в корпусах для соединителей или волноводов [23] экранируются дополнительно экранирующими пластинами, прокладками.

Для экранирования отдельного узла или его части на ПП в УЭМ нужно применять местное экранирование корпусом или пластиной, при этом они могут являться теплоотводом для ЭКБ. Конструктивно корпуса выполняются из одной или двух симметричных [12] и несимметричных [13] частей, сочленяющихся клипсами, защёлками или вставкой в паз. Данный вид соединения, при сочленении двух частей, является дополнительным экраном щели, экранирующим от ЭМП. При жестком креплении корпуса экрана [14], одна из частей жестко (при помощи пайки) крепится непосредственно к ПП, при этом крышка сочленяется с жестким основанием, образуя закрытый экран без щелей, тем самым увеличивая ЭЭ корпусом. Отверстия под соединитель экранируются дополнительными плоскими жесткими прокладками, между экраном и соединителем [16]. Возможно экранирование всех элементов ПП, фольгой с диэлектриком на внутреннем слое [17].

УЭМ крепится к модульному шасси для целостности устройства. Для повышения ЭЭ шасси возможно применение соединения частей между двумя примыкающимися частями: внахлест [20], посредством пазов [21], зажимных пружин или клипс [22]. Крепление всех соединяющихся частей выполняется жестко при помощи винтов или клёпок.

Конструкция корпуса СНП 339 состоит из двух сочленяющихся частей. Соответственно, необходимо экранировать щель между кабелем и соединителем. Возможно применение конструкции перекрытия в виде лепестков, с крепежным хомутом на конце [32], и применения соединителя с гальванической развязкой и экранированием от ЭМП и ЭСР [33]. Соединитель для межплатных соединений может иметь корпус, накладывающийся поверх соединительной вилки или розетки [34]. Также для защиты жгутов электрических кабелей могут быть применены жесткие сеточные экранирующие манжеты [36].

Таким образом, применение тщательно проработанных конструкторских решений по экранированию, наряду с легкими материалами, повысит ЭЭ и уменьшит массу экрана, а следовательно, и конструкцию КА в целом.

2.5 Корпус радиотракта на печатной плате

Вычислены по (2.2) резонансные частоты корпуса радиотракта, с внутренними размерами $a \times b \times c = 81 \times 66 \times 20 \text{ мм}^3$, расположенного на ПП (рисунок 2.17а) разработки ОАО «ИСС» [214]. На рисунке 2.17б показана печатная плата, импортированная из Altium Designer в систему TALGAT. Найдено 46 резонансов корпуса радиотракта в диапазоне частот 2–20 ГГц (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Резонансы корпуса радиотракта

i, j, k	$f_{ij,k}$, ГГц	i, j, k	$f_{ij,k}$, ГГц	i, j, k	$f_{ij,k}$, ГГц	i, j, k	$f_{ij,k}$, ГГц
1,0,0	2,172	3,2,0	8,562	3,0,1	10,96	1,1,2	17,98
0,1,0	2,776	1,3,0	8,606	2,2,1	11,29	2,0,2	18,16
1,1,0	3,525	0,0,1	8,818	3,1,1	11,31	2,1,2	18,37
2,0,0	4,345	1,0,1	9,081	0,3,1	12,13	0,2,2	18,49
2,1,0	5,156	0,1,1	9,244	3,2,1	12,29	1,2,2	18,62
0,2,0	5,552	2,3,0	9,393	1,3,1	12,32	3,0,2	18,8
1,2,0	5,962	1,1,1	9,496	2,3,1	12,88	2,2,2	18,99
3,0,0	6,517	2,0,1	9,83	3,3,1	13,77	3,1,2	19
2,2,0	7,05	2,1,1	10,21	0,0,2	17,64	0,3,2	19,5
3,1,0	7,084	0,2,1	10,42	1,0,2	17,77	3,2,2	19,6
0,3,0	8,328	1,2,1	10,64	0,1,2	17,85	2,3,2	19,98

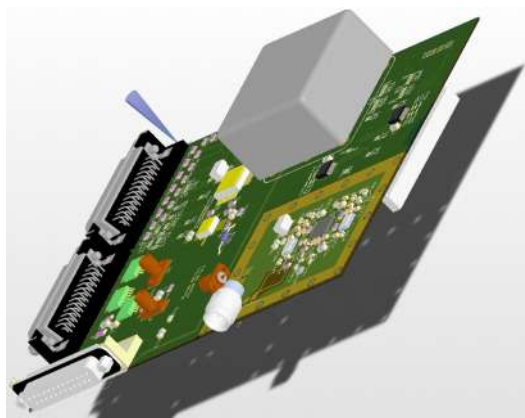
Вычислена ЭЭ (TALGAT (1)) в зависимости от расстояния до щели (высотой $w=50 \text{ мкм}$), с двух сторон корпуса радиотракта (рисунки 2.17в). В таблице 2.9 приведены наихудшие значения ЭЭ на частотах резонансов. Результаты вычислений наихудшей ЭЭ на полезной частоте 1,588 ГГц сведены в таблицу 2.10.

Моделирование проводилось для экрана радиотракта, расположенного на плате с отдельным слоем земли (рисунок 2.18). В непосредственной близости располагается корпус опорного генератора. Представляется нежелательной близость частоты первого резонанса 2 ГГц к рабочей частоте 1,588 ГГц. Это может усилить паразитные взаимовлияния на этой частоте. Наихудшая ЭЭ на полезной частоте 1,588 ГГц имеет место вблизи стенок корпуса экрана. Ниже представлены диаграммы направленности на рабочей и резонансных частотах корпуса, при воздействии вибратором длиной 8 мм, с источником синусоидального воздействия 1 В, расположенным перпендикулярно основанию в центре внутри корпуса радиотракта. (Плоскость

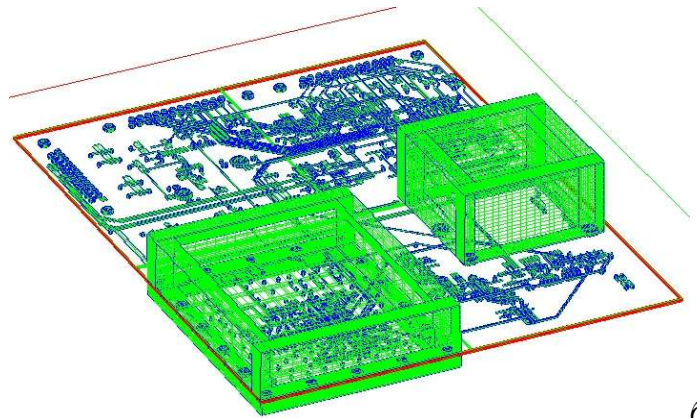
земли, корпус радиотракта и корпус опорного генератора моделировались грубой проводной сеткой.)

Таблица 2.9 – Значения ЭЭ (дБ) корпуса радиотракта

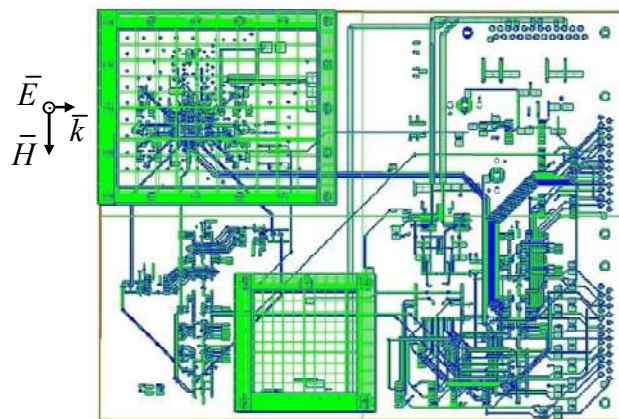
Сверху, p , мм	3,6 ГГц	13,9 ГГц	Сбоку, p , мм	17,5 ГГц
4,8	–8,39	–21,1	3,9	–20,3
10	–23,2	–21,1	12,6	–20,3
26,7	–21,7	–21,1	21,3	–20,3
28	–23,3	–20,5	30	–20,3
48,5	–13,5	–21,1	38,6	–20,3
49,7	–11,4	–20,6	47,3	–20,3



a



б



в

Рисунок 2.17 – Модели реальной ПП в Altium Designer (*a*) и TALGAT (*б*)
при падении на неё плоской электромагнитной волны (*в*)

Таблица 2.10 – Значения ЭЭ (дБ) на частоте $f = 1,588$ ГГц

Сверху, p , мм	ЭЭ, дБ	Сбоку, p , мм	ЭЭ, дБ
1	-3,7	1	0,3
5	-2,5	5	2
15	0,6	10	4
30	6	25	10,4
45	15,2	35	14,7
68	11,2	53	24

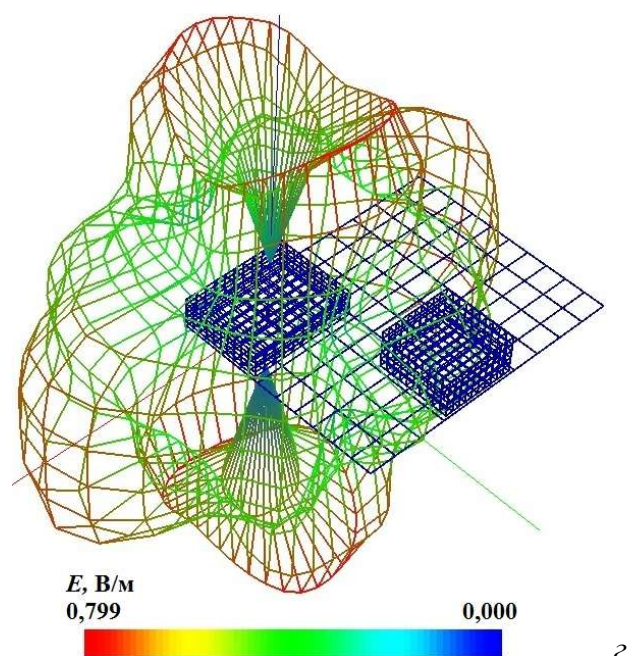
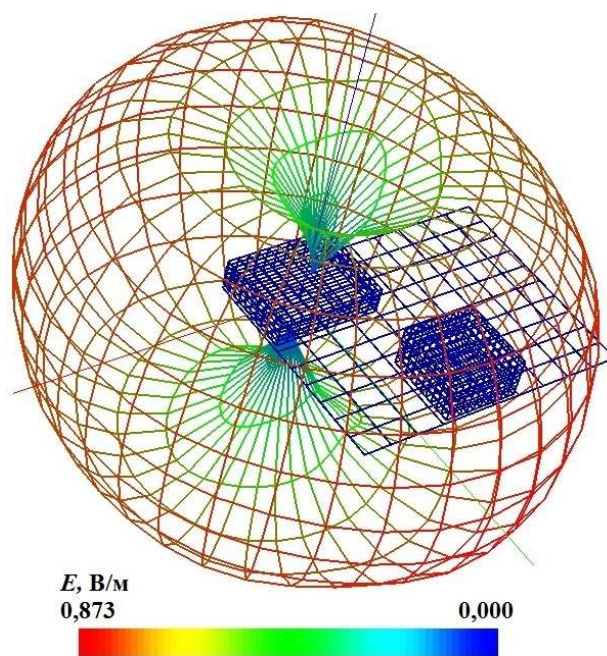
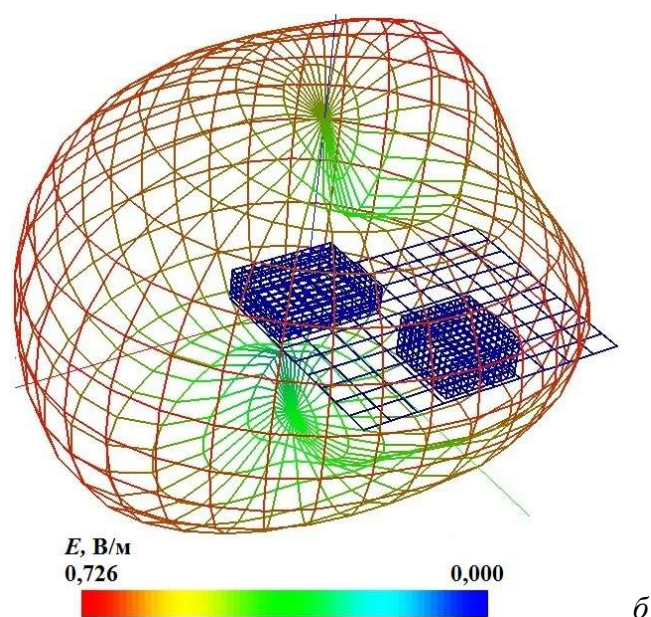
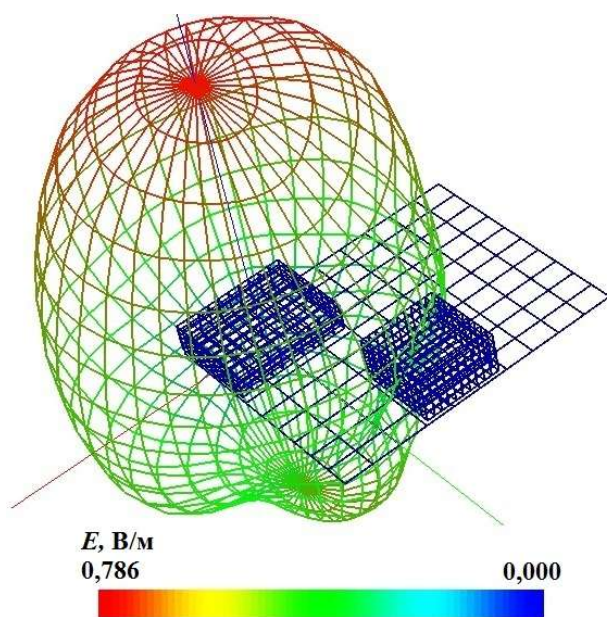


Рисунок 2.18 – Диаграммы направленности:

на частотах полезного сигнала 1,588 ГГц (*a*) и резонансов: 2 (*б*), 3,6 (*в*), 13,9 (*г*) ГГц

2.6 Корпус блока системы автономной навигации космического аппарата

Блок системы САН (рисунок 2.19а) КА имеет крышки толщиной 2 мм, расположенные с двух сторон основания. Под одной из них размещается ПП, радиотракта [215, 216], которая имеет локальное экранирование радиоприемных узлов навигационной системы, а под другой – ПП цифровой обработки [217] навигационных сигналов. Поскольку крышка корпуса из-за накатки металла может создать щель в 0,1–0,3 мм, ЭЭ корпусом может быть снижена. Поэтому целесообразно провести моделирование ЭЭ корпусом, при наихудшем варианте исполнения с щелями (0,3 мм) между крышками и основанием.

Выполнен импорт модели блока САН из программы SolidWorks (рисунок 2.19б) в программу CST MWS (рисунок 2.19в) для оценки ЭЭ корпусом. Внешние геометрические размеры корпуса 43,5×135×293 мм, толщина стенок 2 мм. Импортированная модель доработана, с целью её приближения к реальной структуре блока:

1. Для корпусов экрана, основания и стаканов генератора опорных частот учтены толщины и свойства металла – сплав АМг6В, а также выполнено перекрытие сплошными металлическими полигонами отверстий в корпусе под крепежные элементы.

2. Для ПП, согласно конструкторской документации, учтены толщины и свойства металла и диэлектрика. Применен диэлектрик FR4, в нижнем слое которого располагается сплошной металлический экран из меди толщиной 35 мкм, имитирующий полигон земли в реальной ПП.

3. Для моделей ЭКБ (крупных электронных компонентов и соединителей) применен материал – медь. Диэлектрические прокладки соединителей выполнены из меди, тем самым, имитируя подключение ответной части соединителя и полное экранирование кабелем.

Внутри конструкции блока САН, вблизи моделей ЭКБ чувствительных к ЭМП размещен датчик электрического поля. Вычислена ЭЭ в местах расположения датчиков при воздействии плоской ЭМВ в диапазоне частот до 3 ГГц со всех сторон корпуса, при разной поляризации векторов электрического и магнитного полей, на щели (апертуры) с зазором 0,3 мм между крышками (верхней, радиотракта) и основанием корпуса.

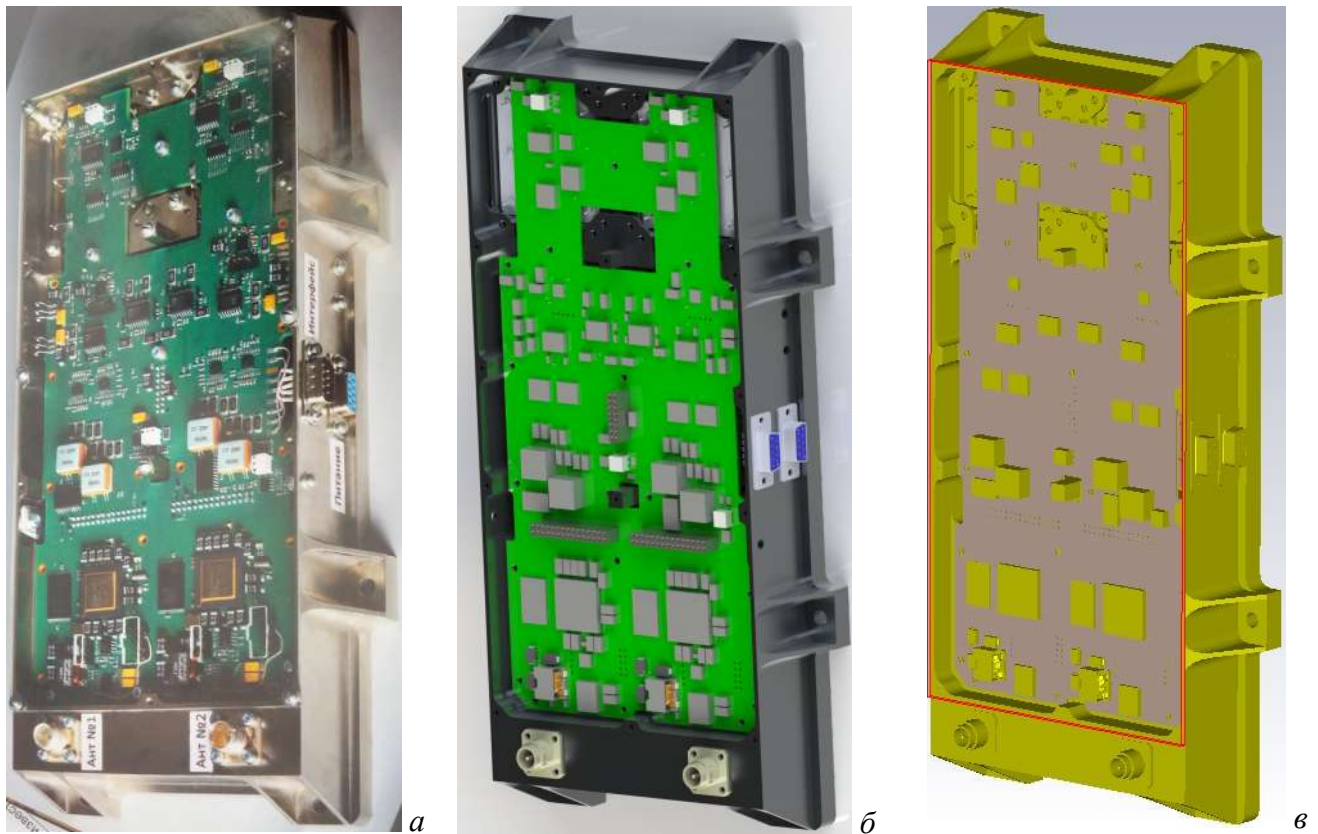
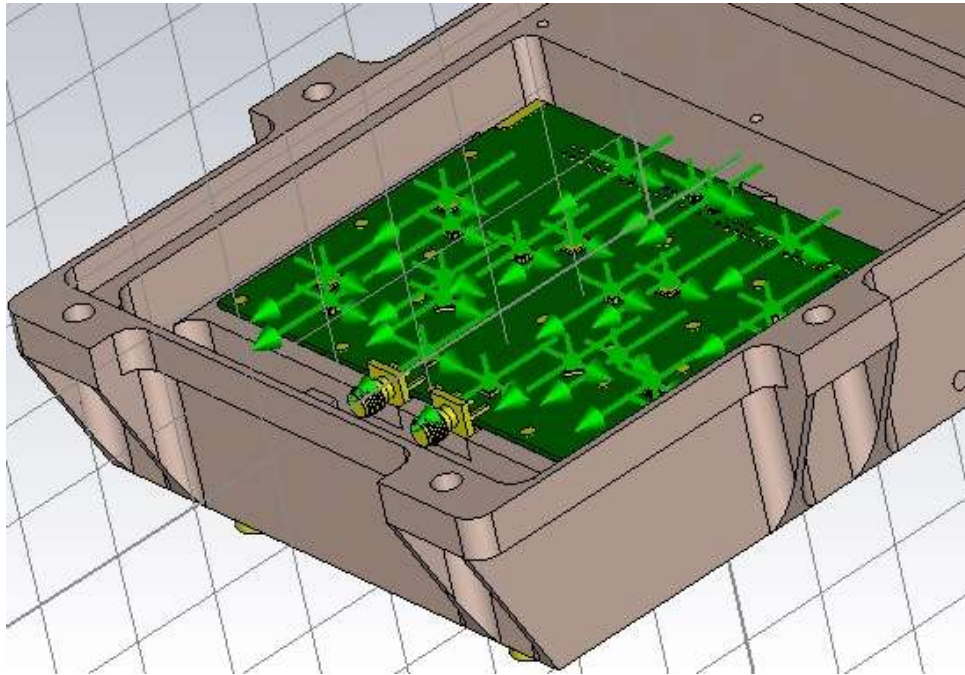


Рисунок 2.19 – Реальная конструкция блока САН (а)
и его модели в программах SolidWorks (б) и CST MWS (в)

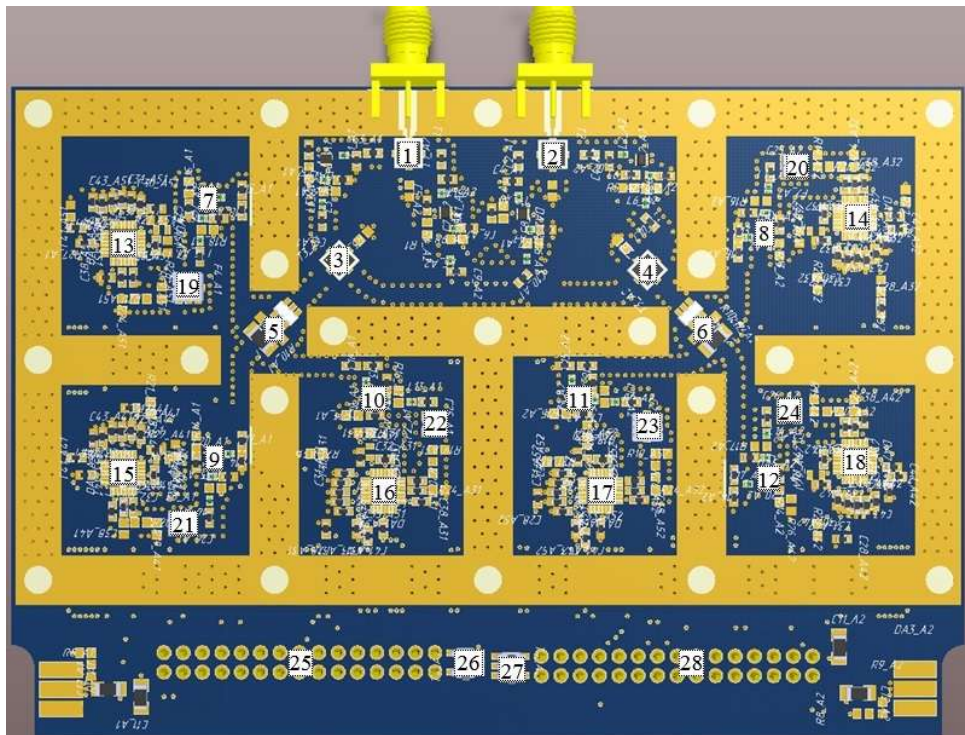
На плате аналоговой обработки размещено 28 датчиков ЭМП (рисунок 2.20 а). Датчики: 1–4 – делители мощности на 2 ($T1-T3$); 5, 6 – делители мощности на 3 ($F1$); 7, 11 – МШУ КОМПАС ($DA6$); 8, 10 – МШУ GLONASS ($DA4$); 9, 12 – МШУ GPS ($DA5$); 7–12 –МШУ; 13–18 – РПУ ($DA7$); 19, 23 – ПАВ фильтры КОМПАС ($F4$); 20, 22 – ПАВ фильтры GLONASS ($F2$); 21, 24 – ПАВ фильтры GPS ($F3$); 25, 28 –соединители ($XS1$, $XS2$); 26, 27 –трансформаторы ($T4$) (рисунок 2.20 б).

На рисунках 2.21, 2.23, 2.25 показана зависимость ЭЭ при падении плоской ЭМВ на продольную сторону блока САН. Из анализа полученных зависимостей (рисунок 2.21) видно, что в местах расположения делителей мощности на 2 ($T1-T4$), датчики 1–4, ЭЭ не менее 21,5 дБ на полезных частотах 1,5–1,7 ГГц, тогда как на частотах резонанса 1,05 и 2,25 ГГц ЭЭ имеет значения 11–15 дБ. В месте расположения датчика 6 возле делителя мощности на 3 ($F1$), со стороны падения ЭМВ, ЭЭ достигает значения 6,2 дБ вблизи полезных частот. В местах (7–12) расположения операционных усилителей, (13–18) МШУ($DA4-DA7$) навигационных систем и (13–15) РПУ ($DA7$), частотные зависимости ЭЭ одинаковы. В данных местах ЭЭ выше 18 дБ на полезных частотах, однако в местах расположения датчиков 7–9, 12–15, 18 ЭЭ составляет 5–8 дБ, а наихудшее значение ЭЭ достигает минус 12 дБ, на частоте резонанса 2,25 ГГц. В местах

расположения 19 ПАВ фильтров КОМПАС и 24 GPS (F3) ЭЭ около нуля (экранирование отсутствует) на частоте 2,25 ГГц, тогда как на полезной частоте ЭЭ составляет 14–16 дБ, а в местах 20 ПАВ фильтров GLONASS (F2) и 21 GPS (F3) (резервный канал) ЭЭ ниже на 6–10 дБ. В местах 25–28 расположения соединителей (XS1, XS2) и трансформаторов (T4) ЭЭ около нуля или вовсе отрицательна (минус 12 дБ).



а



б

Рисунок 2.20 – Места расположения датчиков ЭМП
на плате аналоговой обработки в программах CST MWS (а) и Altium Designer (б)

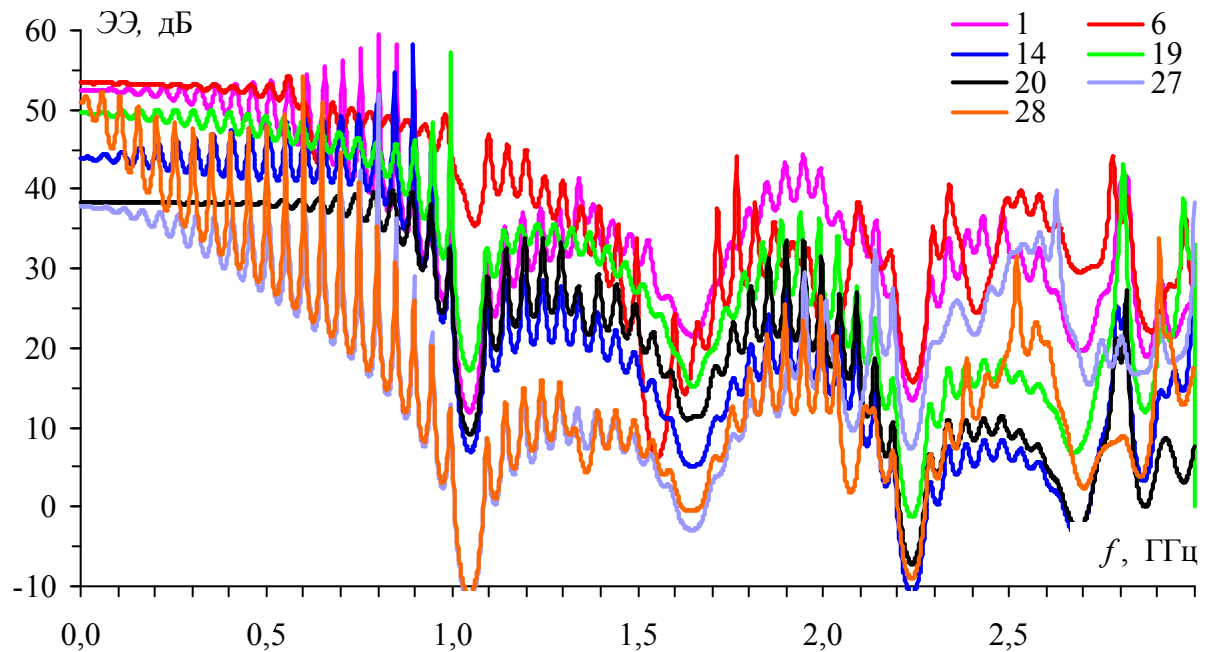


Рисунок 2.21 – Наихудшие частотные зависимости ЭЭ в месте платы аналоговой обработки

Наихудшие значения ЭЭ, в местах расположения датчиков на плате аналоговой обработки, на полезной частоте (ПЧ) в диапазоне 1,5–1,7 ГГц и частотах резонансов $f_1=1,05$ ГГц и $f_2=2,25$ ГГц, сведены в таблицу 2.11

Таблица 2.11 – Наихудшие значения ЭЭ, дБ на плате аналоговой обработки

№	1, 2	3, 4	5	6	7–9, 12 13–15, 18	10, 11 16, 17	19, 24	20, 21	22, 23	25, 28	26, 27
ПЧ	21,5	30	40	6,2	6	18	14–16	10–12	23–28	0	–12
f_1	11–12	25–27	40	30	6	12	16	8	18–23	–12	–6
f_2	13–15	18–20	23	18	–12	15	–3...0	–10	20–25	6–8	4–8

На плате источника питания (ИП) размещено 18 датчиков ЭМП (рисунок 2.22 а). Датчики: 1–16 – контакты источников вторичного электропитания (ИВЭП) ($DA1$, $DA2$); 17, 18 – реле питания ($K1$) (рисунок 2.22 б).

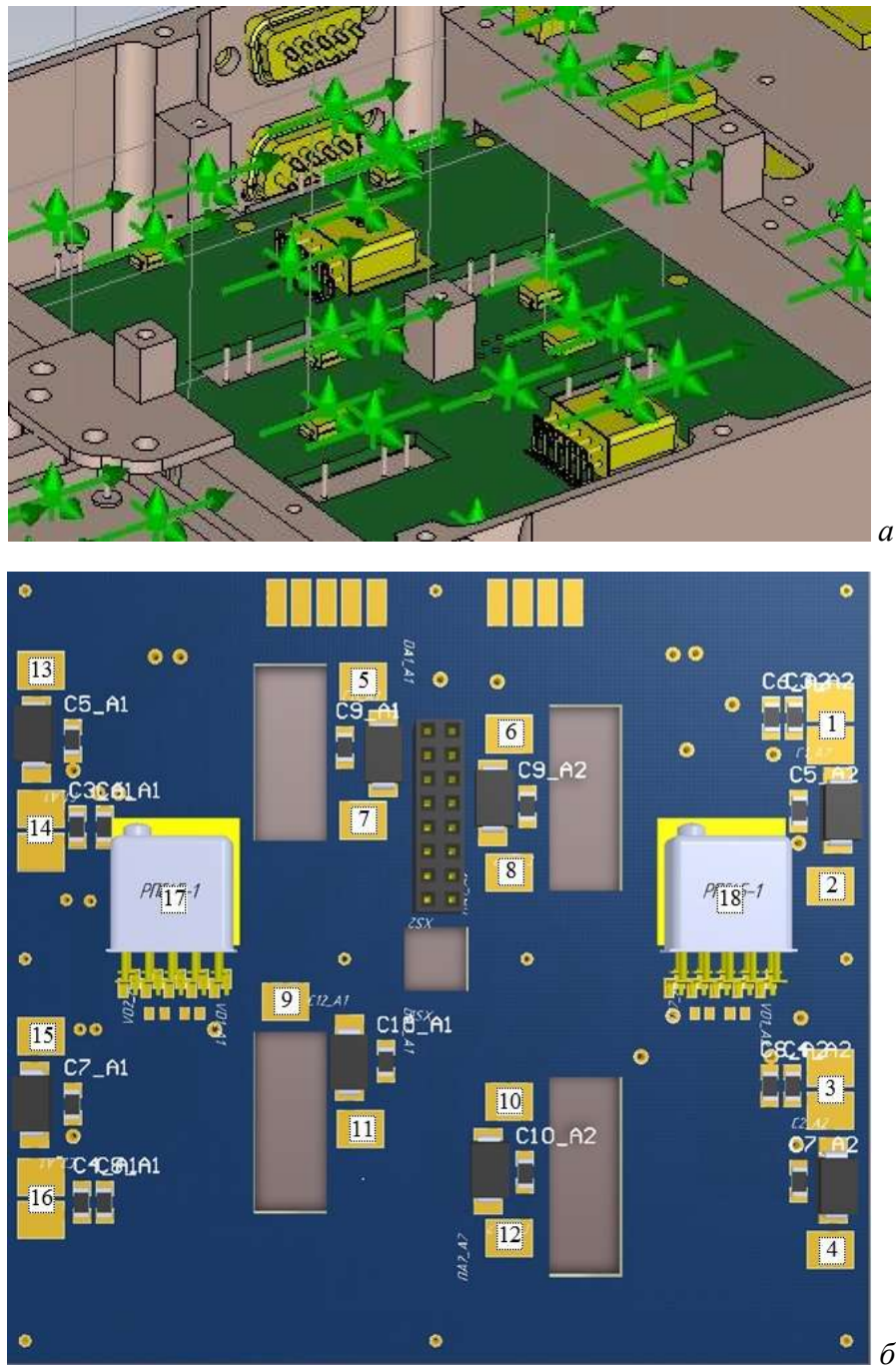


Рисунок 2.22 – Места расположения датчиков ЭМП
на плате ИП в программах CST MWS (а) и Altium Designer (б)

Анализ полученных зависимостей (рисунок 2.23) показал наихудшее значение ЭЭ (3 дБ) на полезных частотах 1,5–1,7 ГГц в месте расположения 13 (+27 В ИВЭП) и 10 (датчик выхода ИВЭП +5 В). Однако на частоте 2,4 ГГц наблюдается наихудшее значение ЭЭ (от минус 11 дБ до минус 17 дБ) для всех датчиков, расположенных на плате ИП (таблица 2.12).

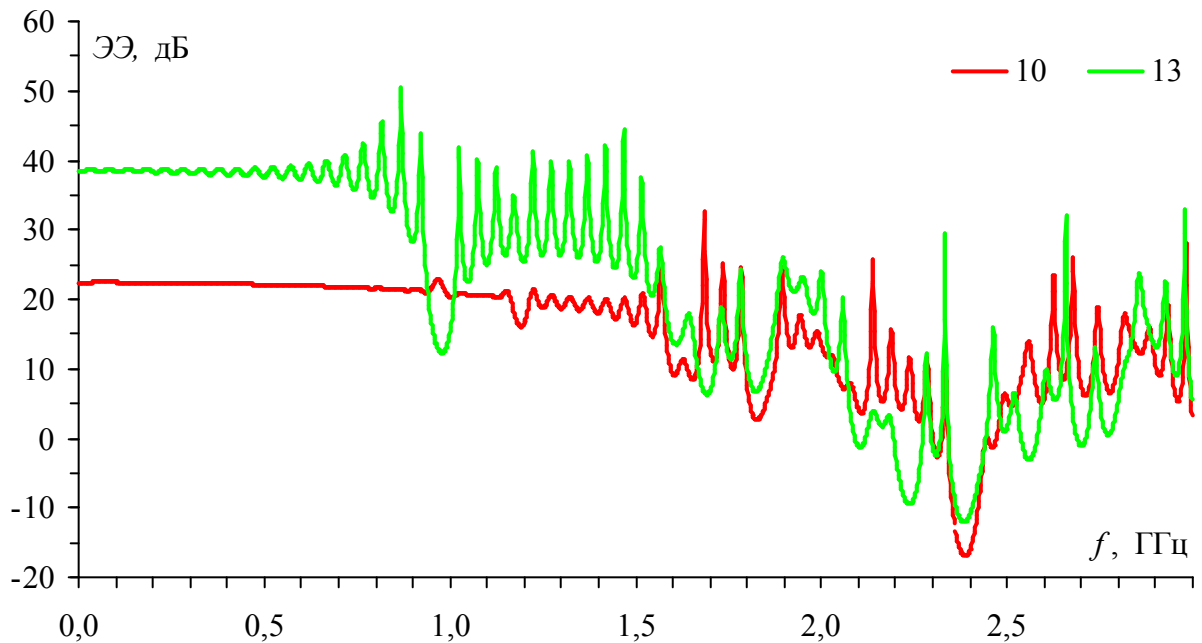


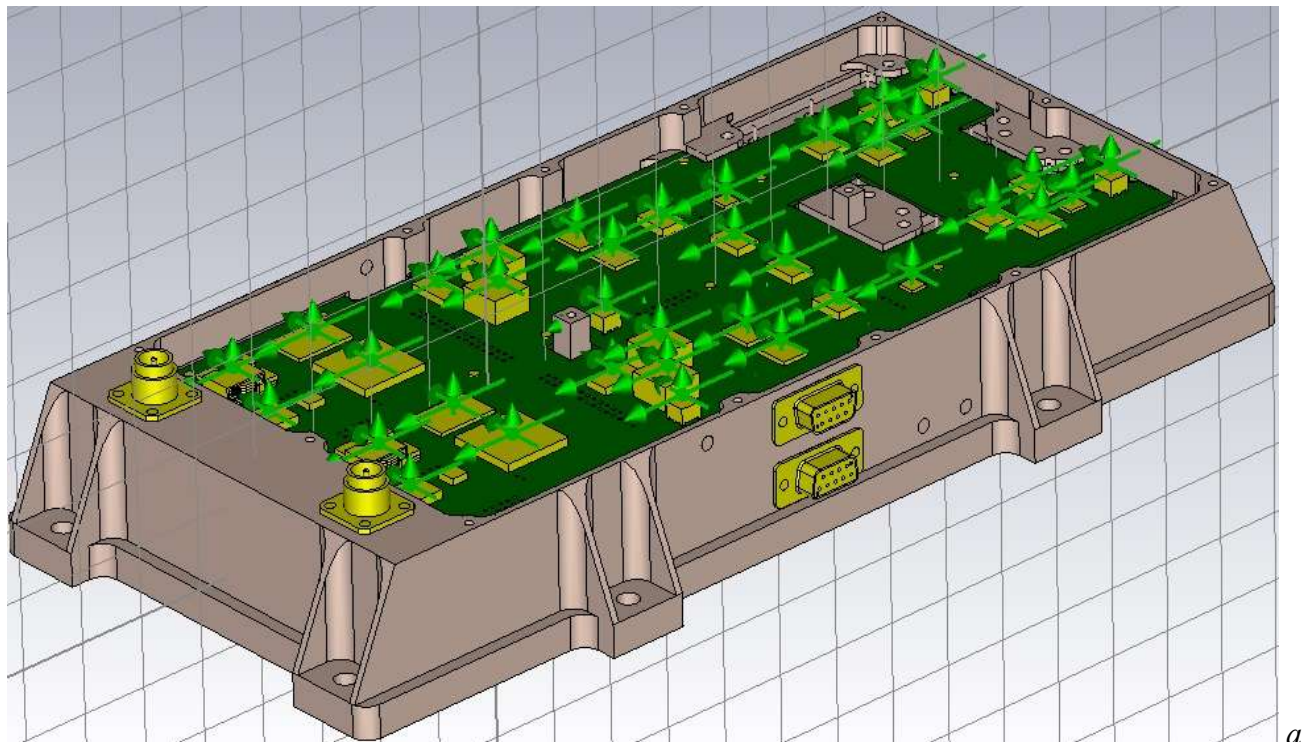
Рисунок 2.23 – Наихудшие частотные зависимости ЭЭ платы ИП (места 10, 13)

Наихудшие значения ЭЭ в местах расположения датчиков на плате ИП на ПЧ и частотах резонансов ($f_3=950$ МГц и $f_4=2,4$ ГГц) сведены в таблицу 2.12

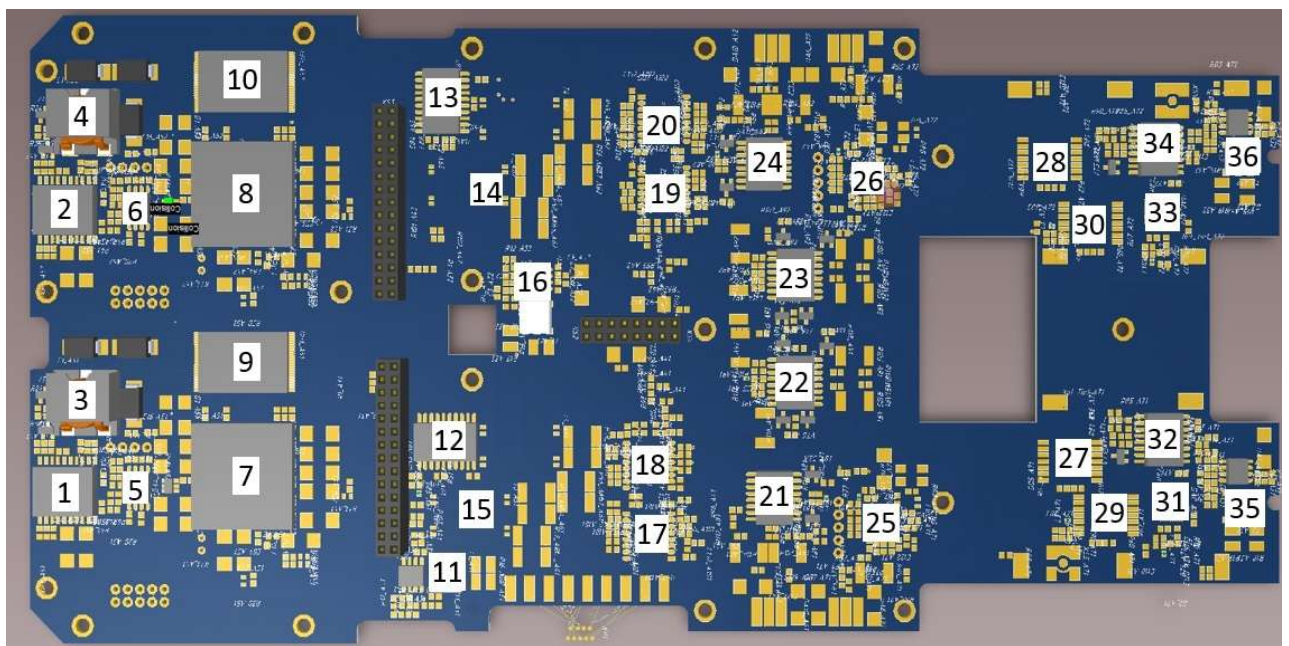
Таблица 2.12 – Наихудшие значения ЭЭ, дБ в местах на ПП ИП

№	1	5	10, 18	3, 15	6, 11	13	15, 17
ПЧ	8	20	8–10	10–12	14–18	3	14
f_3	15	26	19–22	18	25	11	18
f_4	–15	–12	–17	–14	–17	–11	–17

На плате цифровой обработки размещено 36 датчиков электрического поля (рисунок 2.24а). Датчики: 1, 2 – вторичный источник питания процессора (DA3); 3, 4 – дроссели (L1); 5, 6 – ПЗУ (DD1); 7, 8 – процессоры (DD2); 9, 10 – ОЗУ (DD3); 11 – ОУ (DA1) интерфейса процессора; 12, 13 – микросхемы (DA5) интерфейса МКО; 14, 15 – трансформаторы (T3, T4) интерфейса МКО; 16 – трансформаторы (T1, T2) интерфейса процессора; 17–20 – АЦП (DD6, DD7); 21–24 – ОУ (DA11) датчиков тока и напряжения, 25, 26 – тактовые генераторы (DA9); 27–30 – ИС ТТЛ (DD4, DD5); 31, 33 – ЦАП (DA8); 32, 34 – ОУ ЦАП (DA7); 35, 36 – ОУ (DA2) (рисунок 2.24 б).



а



б

Рисунок 2.24 – Места расположения датчиков ЭМП на плате цифровой обработки в программах CST MWS (а) и Altium Designer (б)

Анализ полученных зависимостей ЭЭ (рисунок 2.25), платы цифровой обработки, в местах (1–4, 7–10) расположения микросхем памяти (DD3) и процессора (DD2) показал, что ЭЭ с ростом частоты плавно убывает от 30–45 дБ до отрицательного значения минус 7 дБ на частотах 0,9–1 ГГц. На частотах 1,5–1,7 ГГц полезного сигнала навигационной системы, также как и на частоте 2,05 ГГц, ЭЭ составляет минус 20 дБ. В местах расположения ЦАП первого (27, 29, 31, 32, 33) и второго каналов (28, 30, 33, 36) ЭЭ достаточно высока: 30–50 дБ на низких

частотах, но снижается с ростом частоты, достигая отрицательного значения минус 6 дБ на частоте 0,9–1 ГГц, при этом наихудшее значение (минус 23 дБ) ЭЭ имеет на частоте 2,1 ГГц (показаны наихудшие частотные зависимости для 27 и 30 датчиков). В центральной части платы цифровой обработки ЭЭ также имеет отрицательные значения минус 15 дБ на частотах 0,9–1 ГГц и минус 20 дБ на частотах 1,6–1,7 ГГц. Наихудшая частотная зависимость ЭЭ – в месте датчика 14.

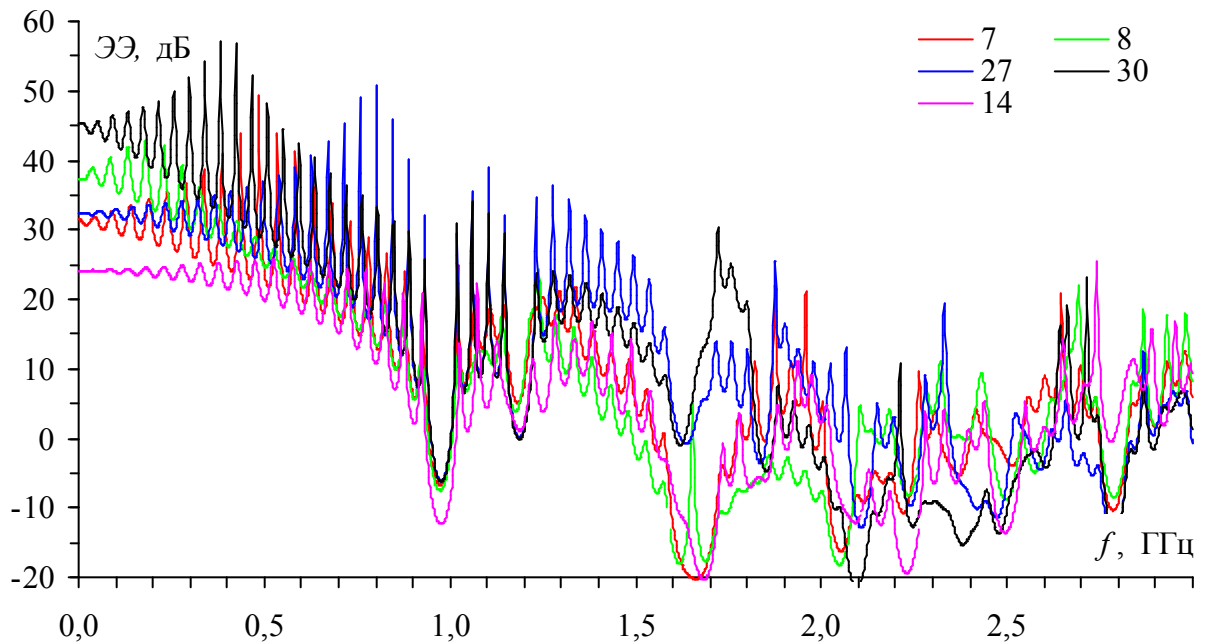
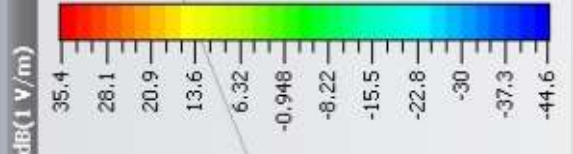
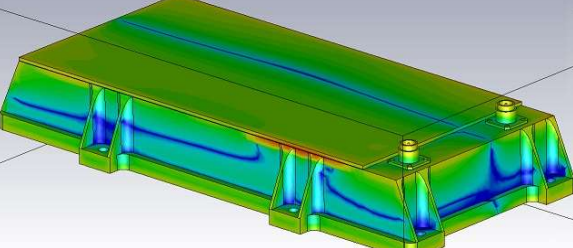
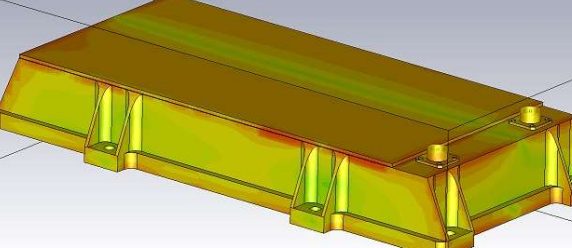
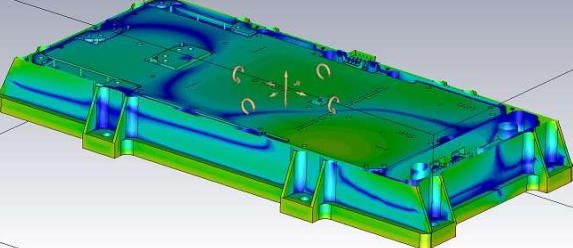
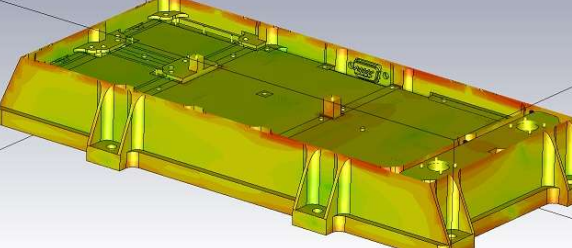
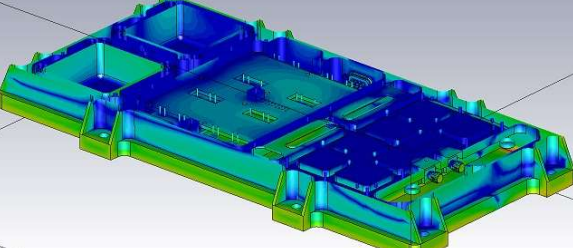
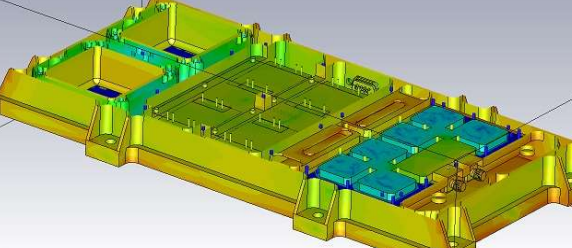
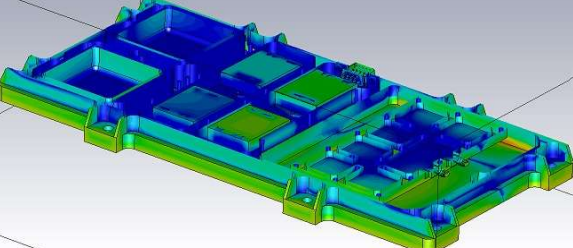
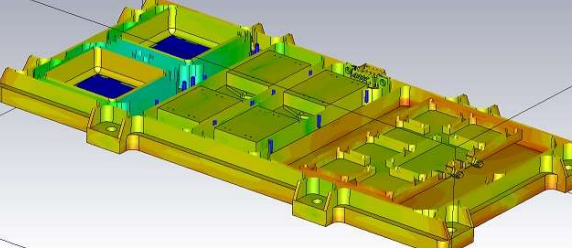


Рисунок 2.25 – Наихудшие частотные зависимости ЭЭ в местах платы цифровой обработки

Вычислены поверхностные токи на частоте $f=1600$ МГц, близкой к центральной частоте полезных сигналов навигационных систем f_i и частоте гетеродина f_c : GLONASS – $f_i=1602$ МГц, $f_c=1593$ МГц; GPS – $f_i=1575$ МГц, $f_c=1584$ МГц; КОМПАС – $f_i=1561$ МГц, $f_c=1552$ МГц.

В таблице 2.13 приведены карты напряженности электрического поля и поверхностных токов корпуса блока САН. Карты позволяют локализовать места их максимальных значений. В свою очередь, это позволяет выявить места наиболее эффективного проникновения ЭМП внутрь корпуса блока САН.

Таблица 2.13 – Карты напряженности электрического и магнитного полей на полезной частоте 1,5 ГГц

Место	Электрическое поле 	Магнитное поле 
Поверхность корпуса		
Плата цифровой обработки		
Платы ИП и аналоговой обработки		
ВИПы и экран аналоговой обработки		

Таким образом, вычисления ЭЭ корпуса блока САН показали, 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 процессора (7, 8) и центральной (14) части корпуса, где ЭЭ имеет отрицательные значения до минус 20 дБ. Также, в местах расположения соединителей на плате аналоговой обработки сигнала ЭЭ имеет значение минус 6 дБ, а в месте расположения (14) РПУ навигационной системы ЭЭ около нуля.

Из таблицы 2.13 видно локальное место проникновения ЭМП внутрь корпуса блока САН, которое находится непосредственно возле размещения радиотракта и процессоров. Для

повышения ЭЭ корпуса блока САН рекомендуется сделать соединительный паз, уменьшить расстояние между крепежными элементами и использовать экранирующие прокладки между всеми сочленяющимися металлическими поверхностями блока (крышки корпуса, экран радиотракта).

2.7 Методика анализа эффективности экранирования элементов конструкций космического аппарата

На основе вышеизложенных отдельных анализов ЭЭ различных элементов конструкции бортовой РЭА КА, разработана методика анализа ЭЭ, схематично представленная на рисунок 2.26. Она состоит в следующем, для выбранных или заданных параметров (толщины t , магнитной проницаемости μ и удельной электрической проводимости σ) металлического корпуса и источника (рецептора), вычисляется (при помощи модели из гл. 1 или модуля в программе TALGAT) частотная зависимость ЭЭ (1) для плоской однородной металлической пластины. Результатом, являются значения ЭЭ в заданном диапазоне частот для выбранного материала, который в случае недостаточного экранирования может быть заменен на другой (с повышенными значениями μ и σ или увеличенной толщиной t). Далее проводится анализ (2) конструкции корпуса, из которого выводятся геометрические размеры $a \times b \times d$ и вычисляются резонансные частоты корпуса согласно (2.2). Полезная рабочая частота устройства, для которого выполняется анализ экранирования, в лучшем случае должна находиться ниже частоты первого резонанса, а в худшем – между частотами резонанса. Её совпадение с частотами резонанса недопустимо: следует изменить размеры корпуса. Выбор (3) анализируемой стороны корпуса стенки с апертурой, на которую производится воздействие плоской ЭМВ, осуществляется с наибольшей стороны. При наличии группы апертур в стенке корпуса, производится перерасчет (4) площади апертур в единую апертуру. Далее для геометрической модели корпуса с апертурой (5) вычисляется (6) частотная зависимость ЭЭ, при помощи модели, изложенной в гл. 1, или модуля в программе TALGAT (1). Выполняется анализ полученных частотных зависимостей ЭЭ. При недостаточном значении ЭЭ могут быть применены дополнительные меры (7) по её повышению (уменьшение площади или количества апертур) и вычислены заново. При получении необходимых значений ЭЭ для конкретного корпуса с апертурой, анализ может быть, при необходимости, закончен или могут быть сделаны более точные оценки ЭЭ (8), применяя модель из гл. 1 с учетом (2.1) или модуль в программе TALGAT (2). Для получения наиболее точных результатов ЭЭ корпусом, в системе автоматизированного проектирования (САПР), например Solid Works, создается модель устройства в целом и добавляются внутренние элементы конструкции (9). Выполняется изменение геометрических размеров апертуры (10), в случае если она получается при неконтролируемых параметрах, вследствие накатки, реза или

других неточностей, возникающих при обработке металла. Добавляются модели элементов герметизации и другие диэлектрические материалы, которые могут быть размещены в апертуре корпуса (11). Из САПР импортируется модель устройства в программу, позволяющую выполнить электродинамический анализ конструкции в целом (12). При этом в программе электродинамического моделирования учитываются свойства металла и диэлектрика, а также ЭКБ, модели которых заменяются на проводящие конструкции. После выполненного электродинамического анализа ЭЭ он может быть закончен или, при недостаточных значениях ЭЭ, повторен с применением мер повышения ЭЭ.

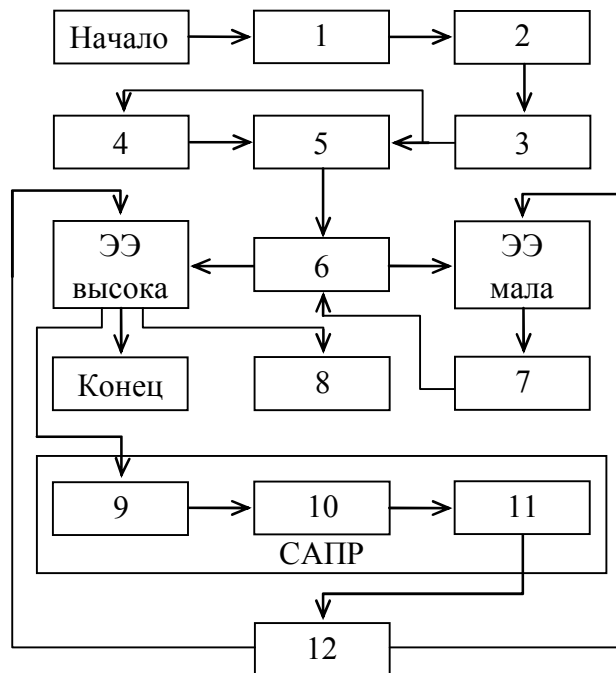


Рисунок 2.26 – Методика анализа ЭЭ элементов конструкций КА

2.8 Основные результаты главы

Приведено аналитическое 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 в программе TALGAT, позволяющих произвести быструю оценку ЭЭ для различных геометрических размеров корпуса с апертурой, а также различными материалами для разных воздействий: электрического, магнитного и электромагнитного полей. На примере корпуса СНП 393 продемонстрировано вычисление ЭЭ при помощи полученного аналитического выражения, в диапазоне частот от 10 кГц до 1 ГГц, с расположением точки наблюдения в начале и середине корпуса. Показано, что зависимости, полученные при помощи программы CST MWS

и реализованного модуля в программе TALGAT, совпадают. В самой удаленной точке наблюдения значения ЭЭ отличаются на 10 дБ в диапазоне частот до 1 МГц и на 6 дБ – в диапазоне частот до 1 ГГц. В диапазоне частот 1–20 ГГц характер поведения частотных зависимостей сохраняется, однако значения ЭЭ на частотах резонансов отличаются до 20 дБ. Среднее время вычисления для каждой частотной зависимости ЭЭ корпуса соединителя, в двух диапазонах частот f_1 и f_2 при количестве точек 1000, составило в TALGAT 4 с, а в CST MWS–1864 с, т.е. получено ускорение в 466 раз. Таким образом, на основе реализованных модулей получены полезные оценки ЭЭ бортовой РЭА КА.

Показано, что при экранировании металлической пластиной переход от алюминия к более легкому сплаву магния ухудшает ЭЭ. Этот переход может оказаться критичным для экранирования низкочастотного магнитного поля. Таким образом, источники больших токов вблизи плоского экрана могут влиять на низкоомные контуры за экраном, поэтому необходимо тщательное моделирование таких структур.

При вычислении ЭЭ корпусом соединителя СНП 339 при полном раскрытии апертуры в диапазоне частот от 10 кГц до 1 ГГц показано, что ЭЭ монотонно убывает со 100 дБ до 0 дБ. На частоте около 5 ГГц ЭЭ снижается до минус 6 дБ, а около 8,6 ГГц – до минус 22 дБ. В диапазоне частот 13–17 ГГц ЭЭ низка: от 0 до минус 10 дБ. Вычисления ЭЭ в начале и середине корпуса соединителя при раскрытии апертуры 2–8 мм с шагом 1 мм показали, что на частотах до 1 ГГц при раскрытии апертуры 2 мм значение ЭЭ увеличивается, по сравнению с полным раскрытием, примерно на 20 дБ, а в промежутках между резонансными частотами – на 10 дБ, тогда как на частотах резонанса корпуса экранирование может ухудшиться.

Применение аналитического выражения для расчета резонансов корпуса и аналитической модели для вычисления ЭЭ прямоугольного корпуса с апертурой в системе TALGAT позволяет произвести быструю оценку резонансных частот и ЭЭ корпусов разных размеров. Результаты оценки показали, что первые резонансные частоты довольно низки, ЭЭ монотонно убывает до частоты первого резонанса, а на участках, близких к резонансным частотам корпуса, резко ухудшается.

Выполнено вычисление ЭЭ корпуса блока САН. Анализ частотных зависимостей 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, где ЭЭ имеет отрицательные значения до минус 20 дБ. Также, в местах расположения соединителей на плате аналоговой обработки сигнала, ЭЭ имеет значение минус 6 дБ, а в месте расположения радиоприемных устройств навигационной системы ЭЭ – около нуля. Вычисленные карты

напряженности поля на поверхности блока указывают на локальные места проникновения ЭМП внутрь корпуса блока САН, которые находятся непосредственно возле размещения радиотракта и процессоров. Таким образом, для повышения ЭЭ корпуса блока САН рекомендуется сделать соединительный паз, уменьшить расстояние между крепежными элементами и использовать экранирующие прокладки между всеми сочленяющимися металлическими поверхностями блока (крышки, основание, экран радиотракта).

3. Устройства для испытаний на электромагнитную совместимость

В данной главе представлены результаты разработки устройств на основе линий передачи поперечных ЭМВ, для исследований и испытаний объектов РЭА на ЭМС, с возможностью проведения испытаний в климатически заданной обстановке, а также исследований по влиянию ЭМП на БО:

- предложен метод оптимизации геометрических параметров ТЕМ-камеры с применением аналитического, квазистатического [218] и электродинамического [219] подходов, позволяющая учитывать реальные неточности, возникающие при создании сложных форм конструкций волноводов из металла и на основе изложенного подхода представлена усовершенствованная конструкция ТЕМ-камеры [220], пригодная для исследований и испытаний небольшой РЭА [221], а также БО [222], представляющих собой клетки и ткани живых организмов;

- обоснована [174, 223, 224] и представлена [225–233] разработка КЭК для совместных климатических и электромагнитных испытаний ЭКБ [234], используемой для бортовой РЭА КА [235, 236], а также описаны её технические характеристики и методы испытаний ЭКБ с её помощью [237];

- обоснована [203, 238, 239] и представлена [240, 241] разработка модуля визуального контроля для биологических исследований внутри ТЕМ-/GTEM-камер [242];

- представлена разработка КЭК для биологических исследований [243] с модулем визуального контроля [244, 245] для изучения в режиме реального времени [246] влияний на БО [247] внутри климатической экранированной ТЕМ-камеры;

- представлены результаты разработки GTEM-камеры [248] и полосковой линии [249] для испытания РЭА на ЭМС.

3.1 ТЕМ-камера

3.1.1 Методика оптимизации

Традиционно ТЕМ-камера (рисунок 3.1) выполняется из центральной пластины 1 и трех объемных частей корпуса с прямоугольным поперечным сечением. Две части имеют линейное сужение поперечного сечения, выполненное в форме пирамидального рупора, а третья имеет форму прямоугольного параллелепипеда с регулярным поперечным сечением вдоль корпуса 2 камеры. Принцип работы камеры заключается в следующем: к одному из соединителей 3 подключается генератор, а к другому – нагрузка 50 Ом. В результате воздействия от генератора, внутри камеры возбуждается поперечная ЭМВ, которая распространяется вдоль камеры и поглощается нагрузкой. Равномерность поля внутри камеры определяется максимальными

габаритами ИО (как правило $1/3$ от расстояния между центральной пластиной и корпусом), который помещается на испытательный стол 4, и соответствием геометрических параметров поперечного сечения камеры, волновому сопротивлению 50 Ом. Подключение внешних устройств к соединителям 3 может отличаться для разных испытаний. В общем случае, корректность полученных результатов будет определяться максимальным рассогласованием внешних устройств с ТЕМ-камерой, в заданном диапазоне частот. Поэтому для лучшего согласования необходимо выполнить оптимизацию всех геометрических параметров и форм элементов ТЕМ-камеры по критерию минимизации максимального значения частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$, в заданном рабочем диапазоне частот.

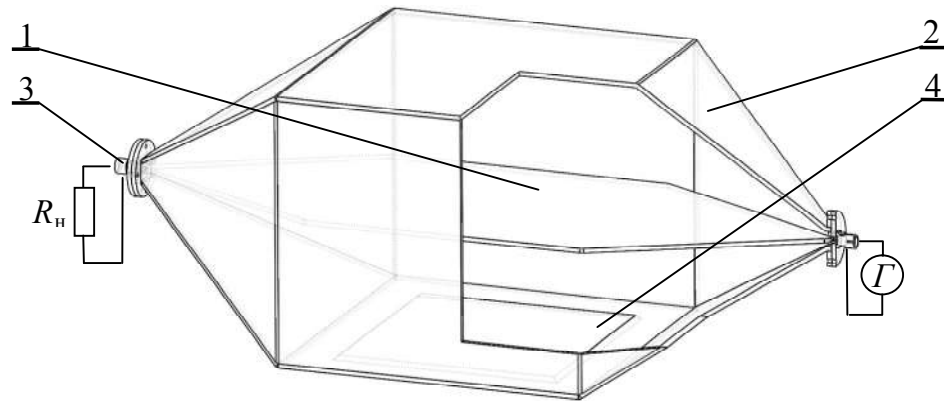


Рисунок 3.1 – Внешний вид и подключение ТЕМ-камеры к генератору

Методика [219] оптимизации геометрических параметров, представлена на рисунке 3.2.

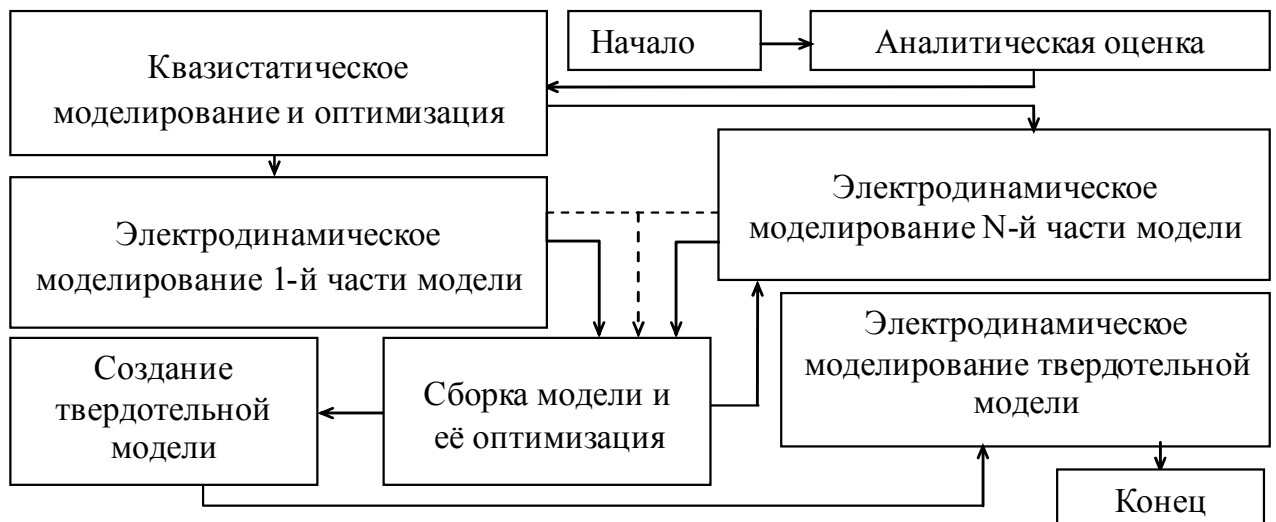


Рисунок 3.2 – Метод вычисления геометрических параметров ТЕМ-камеры

Приближенные аналитические оценки геометрических параметров поперечных (в начале и середине) (рисунок 3.3а) и продольного (рисунок 3.3б) сечений ТЕМ-камеры с волновым

сопротивлением 50 Ом для трех разных ИО 20, 40, 80 мм получены по методике [95, 133, 134 137]. Расчет геометрических параметров ТЕМ-камеры (рисунок 3.3б), выполнен на основе приближенных формул [134] для экранированной полосковой линии [135], метода рефлектометрии во временной области и экспериментального исследования краевой емкости [95], что делает его приемлемым только для быстрой оценки волнового сопротивления линии Z .

Для корректировки аналитически полученных значений применялось квазистатическое моделирование, поскольку оно менее затратно по вычислительным ресурсам, чем электродинамическое.

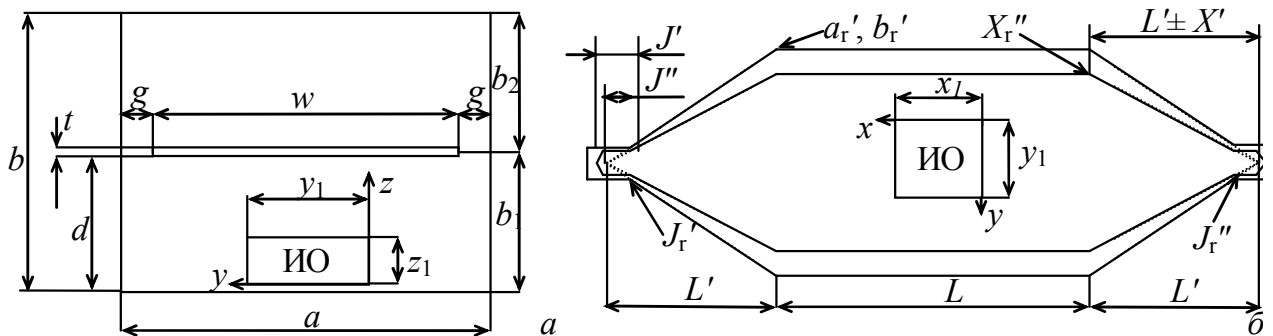


Рисунок 3.3 – Поперечное (а) и продольное (б) сечения ТЕМ-камеры

В программе TALGAT [250] при помощи модуля квазистатического моделирования оптимизированы геометрические параметры ТЕМ-камеры для $Z=50$ Ом. Исходными данными являлись аналитически вычисленные значения. Расчет проводился для разных размеров ИО и толщин $t=1, 2$ мм центрального проводника. Значения Z , полученные при моделировании, подтвердили расчётное значение 50 Ом. Для камеры с высотой ИО 80 мм погрешность вычисления составила не более 1,82 %, тогда как для ИО высотой 20 мм эта погрешность увеличилась до 5 % при $t=2$ мм. Возрастание погрешности связано с тем, что высота камеры для разных ИО изменяется в 4 раза, тогда как толщина центрального проводника остается одинаковой для всех размеров, что оказывает существенное влияние при вычислении погонной емкости камеры.

На основе оптимизированных геометрических размеров поперечных сечений, в программе CST MWS, построены отдельно трехмерные электродинамические модели центральной (рисунок 3.4а) и сужающихся (рисунок 3.4б) частей ТЕМ-камеры для ИО 20 мм. Выполнено электродинамическое моделирование и параметрическая оптимизация центральной и сужающихся частей ТЕМ-камеры. Целью оптимизации являлась минимизация максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$ для $Z=50$ Ом. Также предполагалось, что сужающиеся части ТЕМ-камеры могут иметь не традиционно линейное сужение. На основе этого

разработана модель с гиперболическим раскрывом и выполнена её структурная оптимизация. После оптимизации сужающихся частей структура приняла линейное сужение, при этом на корпусе в области перехода из центральной в сужающуюся часть, имелись скругления с выгибом (рисунок 3.4б). За счет этого максимальное значение КСВН, в диапазоне частот до 2 ГГц, снизилось с 1,12 до 1,06 по сравнению с полностью линейным раскрывом без сгибов.

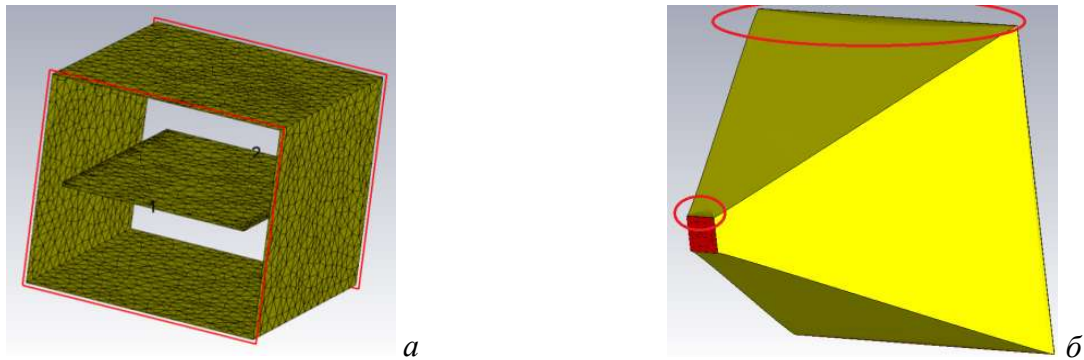


Рисунок 3.4 – Электродинамические модели центральной части (а) и линейного сужения с выгибом (б) ТЕМ-камеры

Построена электродинамическая модель и выполнено электродинамическое моделирование сверхвысокочастотного (СВЧ) соединителя типа SMA с целью проверки корректности модели для применения при моделировании сборки ТЕМ-камеры. Анализ частотной зависимости $|S_{11}|$ показал, что максимальное значение не превышает минус 80 дБ, в диапазоне частот до 18 ГГц. Таким образом, электродинамическая модель СВЧ соединителя минимально влияет на общую характеристику ТЕМ-камеры.

Для электродинамического моделирования и оптимизации сборки ТЕМ-камеры, взяты геометрические параметры, полученные в ходе моделирования и оптимизации отдельно центральной, сужающихся частей и СВЧ соединителя. Оптимизация выполнялась по алгоритму, представленному на рисунке 3.5, где оптимизируемые параметры поперечного сечения центральной части ТЕМ-камеры обозначены без штриха (b , w и т.д.), параметры в конце сужений (в начале и конце камеры), обозначены одним штрихом (b' , w' и т.д.), а те же параметры, но для центральной пластины, обозначены двумя штрихами (b'' , w'' и т.д.). Радиусы скруглений, которые получают в результате сгиба металла в реальной конструкции в каждой части ТЕМ-камеры, отмечены индексом r (b_r , J_r'' и т.д.). Алгоритм цикличен и переход может осуществляться по трём видам этапов: основным (—), дополнительным (— — —) и вспомогательным (— · —).

нескольких круговых проходов подключались дополнительные (---) и вспомогательные (-·-·-) этапы с круговым ходом, приоритет отдавался ходу, располагающемуся иерархически выше. По результатам выполнения дополнительного и вспомогательного этапов находились длины регулярной части на концах сужений J' и центральной пластины J'' , а также длина центральной части камеры L и радиусы скруглений внутри корпуса. Последним этапом корректировалась высота центральной части b и толщина металла t'' корпуса камеры. Алгоритм имел круговой ход по всем шагам и повторялся несколько раз в последовательности от основного к дополнительному и вспомогательному этапам.

С помощью данного алгоритма получены оптимальные геометрические параметры и соотношения для ТЕМ-камеры с волновым сопротивлением 50 Ом, в рабочем диапазоне частот до 2 ГГц, при высоте ИО 20 мм. Камера с оптимальными параметрами (рисунок 3.6а), в поперечном сечении приняла вид прямоугольника с соотношением сторон $a/b=a'/b'=1,15$, который образует центральную ($a=138,1$ мм, $b=120,3$ мм) в форме параллелепипеда 1 и две сужающиеся 2 ($a'=8,3$ мм, $b'=7,2$ мм) в форме пирамид части. Длина центральной части равна её ширине $L=a$. Угол, образованный в результате соединения центральной и сужающихся частей, имеет радиус скругления $a_r=1$ мм. Сужающиеся части имеют линейные сужения под углами $32,7^\circ$ и $36,7^\circ$ относительно продольной оси камеры на расстоянии $L'=88,3$ мм. В каждой части выполнено скругление радиусом $J_r=3,4$ мм (рисунок 3.3б) и имеется стягивающее кольцо 3, толщиной $J'=2$ мм, с прямоугольным вырезом внутри и соотношением сторон $a_1/b_1=1,15$. По краям стягивающего кольца 3 имеются четыре отверстия с резьбовым соединением 4 (рисунок 3.6б), для крепления, с помощью винтов, держателя соединителя 5, через токопроводящую пасту 6. Держатель соединителя 5 имеет цилиндрическую форму с четырьмя резьбовыми отверстиями 7 и пятью отверстиями под СВЧ соединитель 8, четыре из которых 9 имеют одинаковый диаметр, а пятое 10 имеет больший диаметр, соответствующий волновому сопротивлению 50 Ом, и необходимо для вывода и соединения центрального проводника 11 СВЧ соединителя 8 с центральной пластиной 12. Полость между центральным проводником 11 соединителя 8 и внешним диаметром отверстия 10 заполнена диэлектриком. В одной из широких сторон центральной части имеется вырез с фаской 13 под угол 45° , который необходим для помещения внутрь ИО с габаритами $x_1 \times y_1 \times z_1$. Высота z_1 ИО не должна превышать $1/3$ от расстояния d . Испытательный стол 14 выполнен из проводящего материала и имеет фаску под угол 45° . На него помещается ИО и закрывается при помощи прижатия кромки испытательного стола 14 к кромке выреза 13 в центральной части 1 корпуса, чем обеспечивается минимальное искажение поля под ИО и повышение минимального значения ЭЭ корпусом камеры. Центральная пластина 12 представляет собой плоский проводник из проводящего материала

толщиной $t''=2$ мм, с прямоугольным поперечным сечением. Также, центральный проводник на концах имеет сужение под угол 46° на расстоянии $J''=2,19$ мм и угол 61° на расстоянии $L'+X''-J''$, а между двумя углами на кромке имеется вырез в форме дуги 15 (рисунок 3.6б). Параметр $X''=5,5$ мм является расстоянием между кромками корпуса и центрального проводника (рисунок 3.3б). Между сужающимися частями имеется прямолинейный отрезок вдоль продольной составляющей корпуса, длиной $L-2X''$. В начале и конце центральной пластины с торца выполнен паз в виде отверстия 16 под механическое крепление и пайку центрального проводника 11 соединителя 8, чем обеспечивается улучшение согласования волнового сопротивления в начале и конце камеры, с генератором и нагрузкой соответственно.

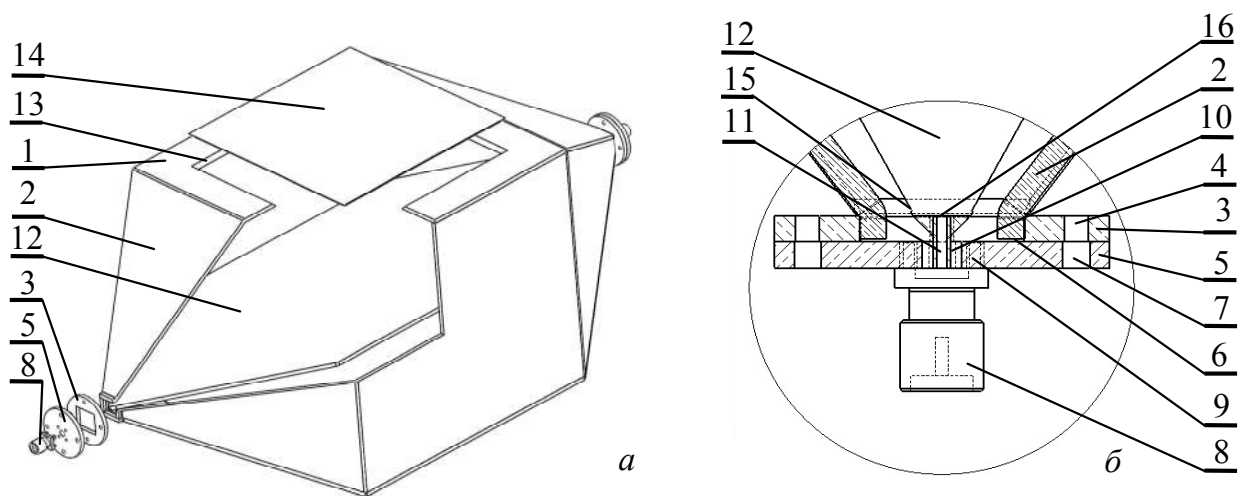


Рисунок 3.6 – Сборочный чертеж (а)
и продольное сечение ТЕМ-камеры возле СВЧ соединителя (б)

Выполнен анализ соотношений сторон поперечного сечения электродинамической модели ТЕМ-камеры. По аналитическим формулам из главы 1 для волнового сопротивления с конечной толщиной центрального проводника (1.36) и (1.38) вычислена и построена графическая зависимость (рисунок 3.7) волнового сопротивления $Z(w/b)$ при разных значениях нормированного параметра a/b и при $t/b=0,017$, которое определено для толщины центрального проводника 2 мм относительно максимальной высоты ИО 20 мм. (Толщина центрального проводника выбрана 2 мм для жесткости конструкции и возможности выполнить торцевое сверление в его начале и конце, для центрального проводника СВЧ соединителя.)

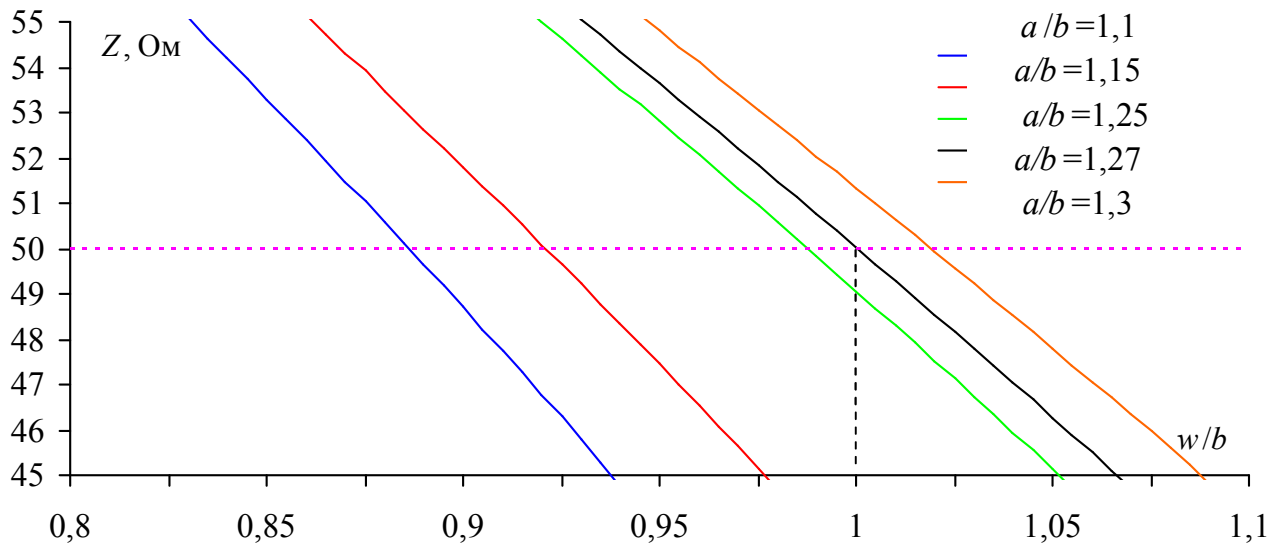


Рисунок 3.7 – Зависимость $Z(w/b)$ при разных a/b и $t/b=0,017$

Для достижения максимальной площади ИО необходимо обеспечить большую ширину центрального проводника по отношению к ИО. Соответственно зазор g между корпусом и центральным проводником должен быть минимальным, что определяет равномерность ЭМП под ИО. При этом оптимальным будет соотношение $a/w=w/b=1$, при $g \rightarrow 0$. На практике $Z=50$ Ом при $g \rightarrow 0$ получить невозможно, поскольку от расстояния g зависит погонная емкость (1.38) экранированной полосковой линии. Пренебрегая соотношением $a/w=1$ и допуская $w/b=1$, оптимальное значение между шириной a и высотой b корпуса камеры получим из зависимости $Z(w/b)$ равным $a/b=1,27$ (рисунок 3.7). Выполнена оптимизация геометрических параметров по алгоритму (рисунок 3.5) и вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ для значений обоих параметров a/b и a'/b' равных 1,15 и 1,27 (рисунок 3.8).

Из рисунка 3.8 видно, что в диапазоне частот до 1,8 ГГц максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 33 дБ для $a/b=a'/b'=1,27$ и минус 24 дБ для $a/b=a'/b'=1,15$. Однако, верхняя граничная частота ТЕМ-камеры сдвинулась в область НЧ на 100 МГц и составила 2 ГГц. Таким образом, в диапазоне частот от 1,8 до 2 ГГц измерения в подобной камере проводить не возможно. Также, камера имеет большие габариты, что с точки зрения экономических затрат на материал может быть нецелесообразно. Однако, камера с соотношением сторон 1,27 может быть применена для измерения в диапазоне частот до 1,8 ГГц, с более согласованными параметрами. Конструкция камеры должна быть выполнена аналогично вышеописанной для соотношения сторон $a/b=a'/b'=1,15$, но при изменении геометрических параметров $a/b=a'/b'=1,27$, $L=a=140,8$ мм, $b=120,3$ мм, $a'=9,1$ мм, $b'=7,2$ мм, $a_r=1$ мм, $J_r=3,4$ мм, $J'=2$ мм, $X''=5,5$ мм. Сужающиеся части имеют линейные сужения под углами $32,5^\circ$ и 39° относительно продольной

оси камеры на расстоянии $L'=88,8$ мм. Центральный проводник на концах имеет сужение под угол 46° на расстоянии $J''=2,19$ мм и угол $58,7^\circ$.

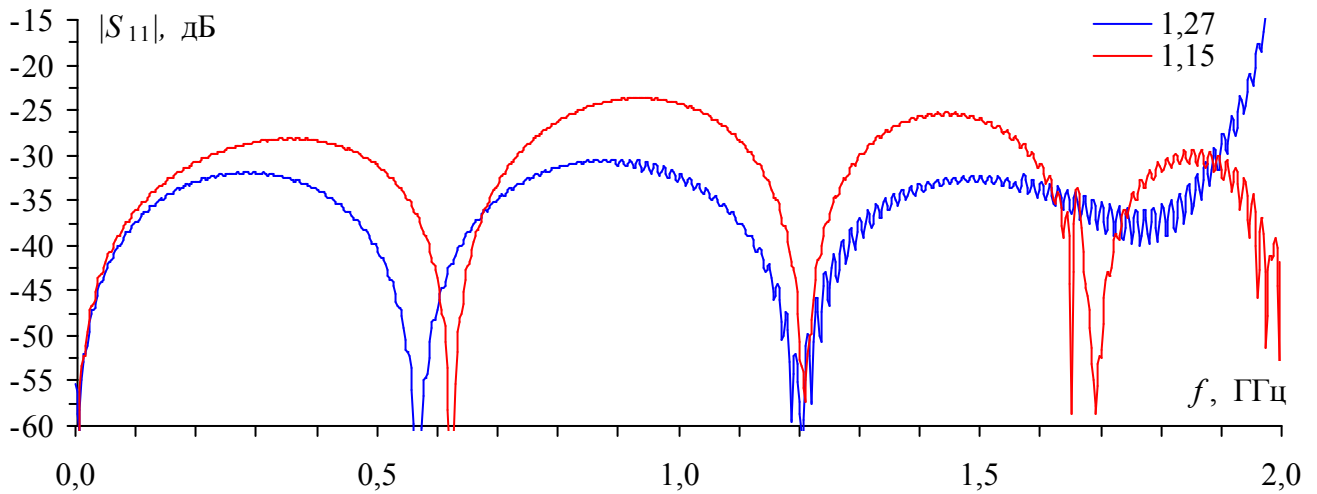


Рисунок 3.8 – Вычисленные с помощью TLM метода частотные зависимости $|S_{11}|$ для электродинамических моделей TEM-камер с соотношением сторон $a/b=a'/b'=1,27$ и $1,15$ (без выреза под испытательный стол)

3.1.2 Результаты моделирования и измерений

По полученным оптимальным параметрам электродинамической модели, построенной и оптимизированной в CST MWS (рисунок 3.9а), построена твердотельная модель из листового материала в программе SolidWorks (рисунок 3.9б). В качестве материала в моделях выбрана медь с потерями ($\rho=8930$ кг/м³, $\sigma=5,8 \times 10^7$ См/м) и тефлон ($\epsilon_r=2,1$). При построении твердотельной модели учитывались характеристики реальных слесарных и сварочных инструментов (точность гидроабразивного реза (0,1 мм), угол и возможности гибочного станка), а также сварка металла и увеличение кромок металла в результате его растяжения или сжатия. Далее твердотельная модель из SolidWorks импортировалась в программу CST MWS, где проводилось её электродинамическое моделирование. По твердотельной модели выводились чертежи для станков, изготовленные элементы конструкции изначально частично сваривались (рисунок 3.10а). Конструктивно корпус TEM-камеры выполнен из четырех медных пластин, на концах каждой из которых имеется по два изгиба. Совокупность медных пластин образует центральную часть в виде прямоугольного параллелепипеда и две сужающиеся части, в форме пирамиды с вытянутыми концами, на которые припаиваются стягивающие кольца.

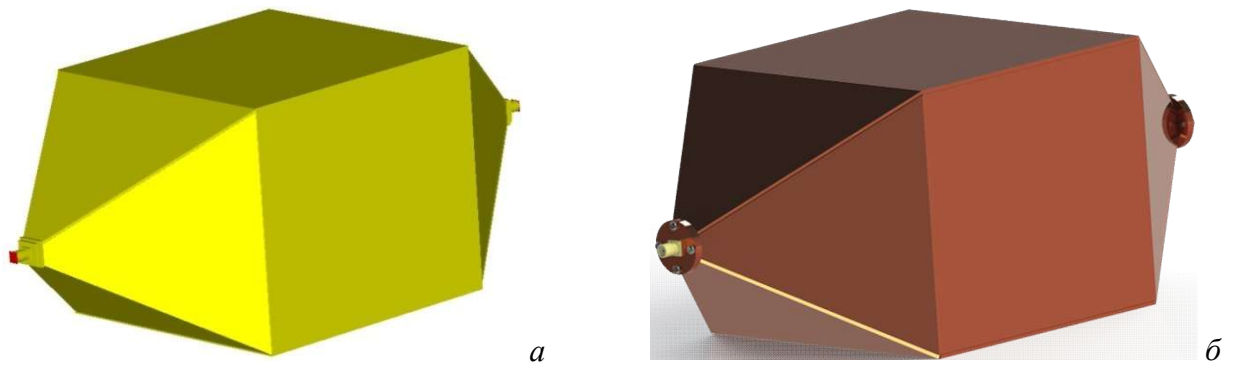


Рисунок 3.9 – Электродинамическая (а) и твердотельная (б) модели ТЕМ-камеры

На рисунке 3.10 показана поэтапная сборка экспериментального макета ТЕМ-камеры для измерения его частотной зависимости $|S_{11}|$, при помощи измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-40. Первоначально измерения (рисунок 3.11) проводились лишь при перекрытии (без сварки) открытой стороны корпуса камеры (рисунок 3.10а) сплошной медной пластиной с выгибами на концах без выреза под испытательный стол (рисунок 3.10б). Далее конструкция полностью сваривалась, красилась и отдельные части (крепеж под соединитель и стягивающее кольцо) промазывались медной пастой (рисунок 3.10в). Также, центральная пластина припаивалась к центральным проводникам СВЧ соединителя и измерения повторялись.

На рисунке 3.11 показаны вычисленные с помощью метода конечных элементов (FEM) в частотной области и метода матриц линий передач и во временной области (TLM) в CST MWS частотные зависимости $|S_{11}|$ для моделей ТЕМ-камеры без испытательного стола, полученные без учета реальных изгибов, реза и сварки металла (электродинамическая модель) и с их учетом (твердотельная модель). Также приведена измеренная частотная зависимость $|S_{11}|$ экспериментального макета ТЕМ-камеры без испытательного стола (рисунок 3.10б), при плотном прижатии сплошной медной пластины к боковым стенкам корпуса. Макет изготовлен по чертежам из SolidWorks. Как видно, зависимости согласуются, причем лучше при более точном учете деталей.

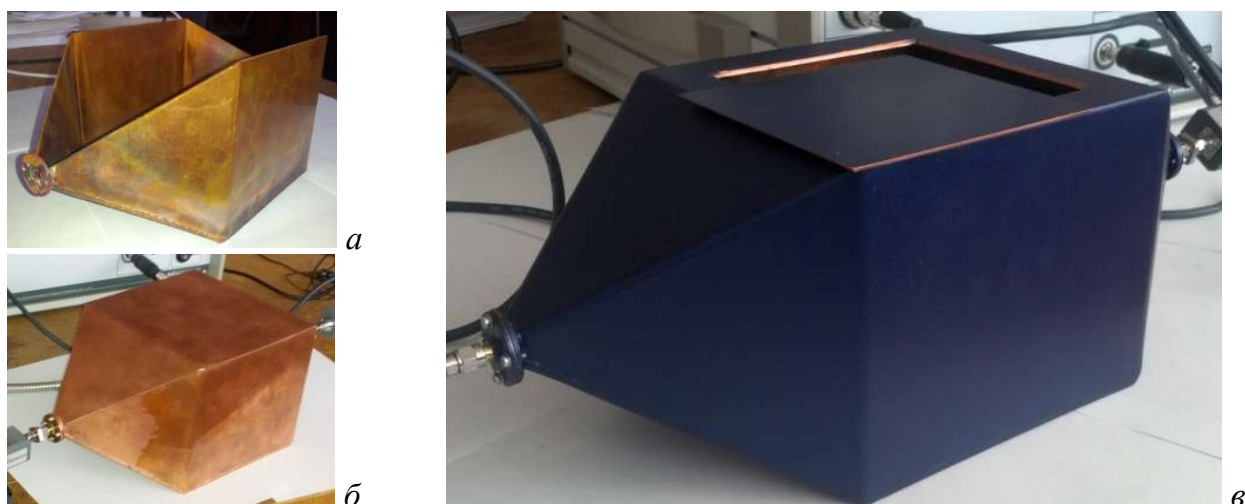


Рисунок 3.10 – Экспериментальный макет ТЕМ-камеры без верхней стенки (а) и при её перекрытии сплошной медной пластиной (б), собранная ТЕМ-камера с испытательным столом (в)

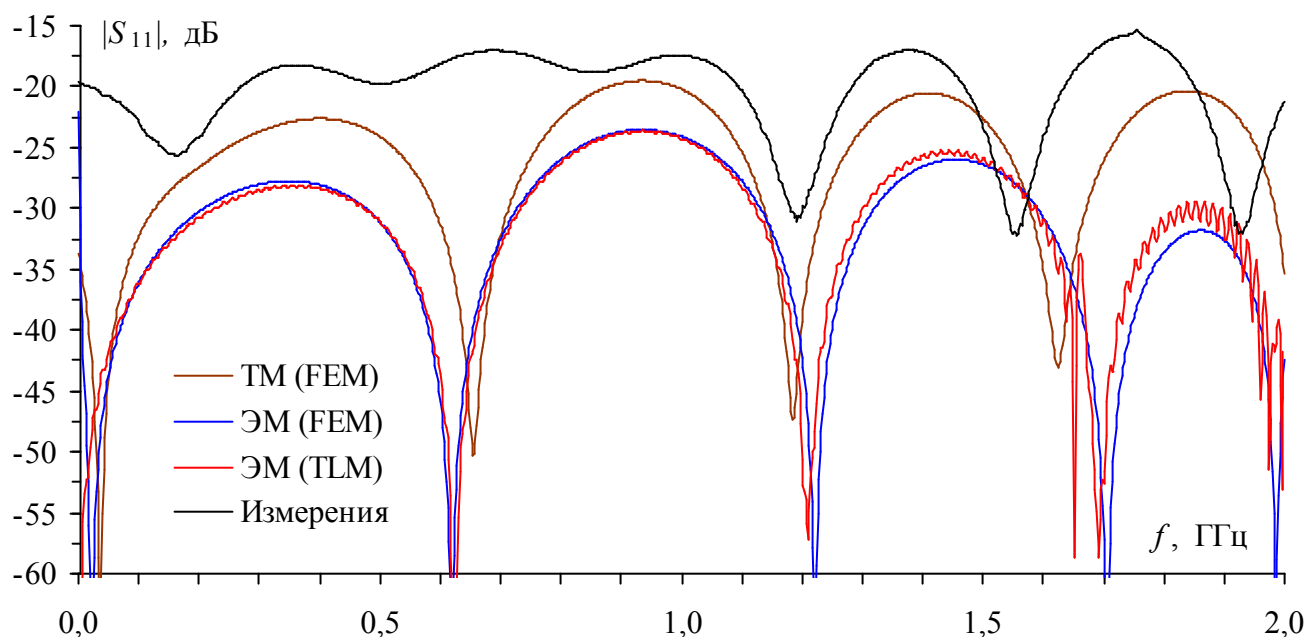


Рисунок 3.11 – Измеренная и вычисленные с помощью FEM и TLM методов частотные зависимости $|S_{11}|$ для твердотельной (ТМ) и электродинамических (ЭМ) моделей ТЕМ-камеры без выреза под испытательный стол

Из рисунка 3.11 видно, что измеренная частотная зависимость $|S_{11}|$ макета с перекрытием открытой стенки сплошной пластиной не превышает минус 15,4 дБ, в полосе частот до 2 ГГц. Вычисленные значения для твердотельной модели близки к измеренным и не превышают минус 19,5 дБ, тогда как для электродинамической модели это значение составляет минус 23,5 дБ. Большое отклонение значений $|S_{11}|$ между вычисленными значениями для твердотельной

модели и измеренными для макета объяснимы тем, что верхняя сплошная медная крышка не была приварена к боковым стенкам, в результате имелись щели (до 3 мм) между стенкой и корпусом.

На рисунке 3.12 показаны измеренные и вычисленные (TLM) частотные зависимости $|S_{11}|$, для электродинамической модели с вырезом под фаску 45° для испытательного стола и экспериментального макета ТЕМ-камеры с приваренной верхней крышкой с вырезом (рисунок 3.10в). В экспериментальном макете центральная пластина припаяна к центральному проводнику СВЧ соединителя, а держатель соединителя и испытательный стол на краях промазаны медной пастой. При моделировании полагалась щель 0,1 мм между корпусом и испытательным столом. Соединение корпуса и испытательного стола осуществлялось при помощи восьми резисторов сопротивлением 0,1 Ом каждый, что имитировало полный контакт испытательного стола и корпуса, во втором случае значение сопротивлений было увеличено до 100 Ом, что имитировало сопротивление медной пасты при комнатной температуре.

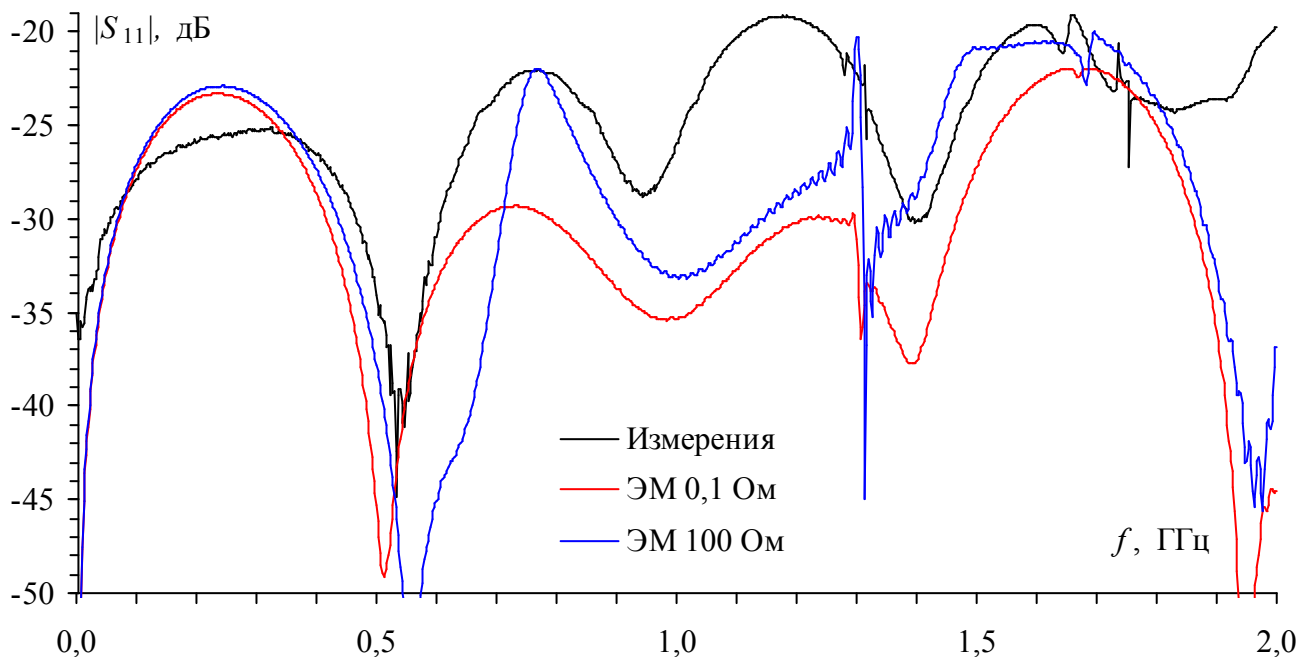


Рисунок 3.12 – Измеренная частотная зависимость $|S_{11}|$ для экспериментального макета ТЕМ-камеры с вырезом и вычисленные частотные зависимости $|S_{11}|$ для электродинамической модели (TLM) с вырезом и соединением испытательного стола с корпусом при помощи резисторов 0,1 Ом и 100 Ом

Из рисунка 3.12 видно, что максимальное значение измеренной частотной зависимости $|S_{11}|$ для макета с вырезом под испытательный стол не превышает минус 18 дБ, в полосе частот до 2 ГГц, что совпадает с максимальным значением $|S_{11}|$ для твердотельной модели

(рисунок 3.11). Вычисленные максимальные значения для электродинамической модели при соединении испытательного стола к корпусу через резисторы 100 Ом близки к измеренным и не превышают минус 20,5 дБ, тогда как для электродинамической модели это значение составляет минус 21,9 дБ. Большое отклонение значений $|S_{11}|$, в диапазоне частот 0,6–1,3 ГГц, между вычисленными и измеренными значениями, для макета объяснимы тем, что реальные геометрические размеры поперечного сечения на одном из концов экспериментального макета камеры оказались соответствующими вычисленным ($a'=8,3\pm0,1$ мм, $b'=7,2\pm0,1$ мм), тогда как на другом – не соответствующими ($a'=8,8\pm0,1$ мм, $b'=7,1\pm0,1$ мм). Также, анализ частотных зависимостей $|S_{11}|$ показал (рисунок 3.12), что неравномерности вблизи 1,3 ГГц, связаны с размерами испытательного стола (100 мм) и центральной пластины (106,2 мм), а вблизи 1,6–1,8 ГГц – с длиной сужающейся части камеры. Последняя неравномерность также наблюдается у ТЕМ-камеры без испытательного стола (рисунок 3.11). Критическая частота камеры соответствует ширине поперечного сечения 140 мм и равна 2,1 ГГц.

Изготовлен второй макет ТЕМ-камеры, у которого реальные размеры практически совпадали (с одного конца $a'=8,2\pm0,1$ мм, $b'=7,3\pm0,1$ мм, с другого $a'=8,1\pm0,1$ мм, $b'=7,2\pm0,1$ мм) с вычисленными. Чертежи камеры были одинаковыми, отличие реальных конструкций заключалось только в том, что в результате сварки размеры в начале и конце каждой камеры неконтролируемо изменялись (до 0,5 мм). Также, производилась корректировка зазора, от 0,5 до 0,1 мм, между испытательным столом и корпусом, для обеих ТЕМ-камер. Измерения (рисунок 3.13) обоих макетов проводились без медной пасты на гранях испытательного стола. Из рисунка 3.13 видно, что у второго макета ТЕМ-камеры максимальное значение $|S_{11}|$ снизилось до минус 20 дБ, что может объясняться меньшим разбросом геометрических размеров в начале и конце камеры.

Вычисление ЭЭ проводилось при воздействии плоской ЭМВ на корпус ТЕМ-камеры со стороны испытательного стола: без него (сплошной полигон в регулярной части) и с ним, при ширинах щели 0,1 и 0,5 мм. Эти значения имитировали допуск на раскрой металла, а также плотное (0,1 мм) и неплотное (0,5 мм) прижатия граней испытательного стола к граням выреза в корпусе камеры. Вычисление ЭЭ проводилось для трех форм граней: изначальная конструкция с углом 90° (рисунок 3.14а), и доработанные – с углом 45° и со ступенчатым вырезом (рисунок 3.14б, в). Вырезы сделаны таким образом, чтобы исключить углубление испытательного стола внутрь камеры. Для электродинамической модели, соединения испытательного стола с корпусом камеры выполнялись по периметру при помощи восьми сопротивлений, расположенных на углах и кромках выреза корпуса и испытательного стола (рисунок 3.14г). Поле вычислялось при помощи 65 точечных виртуальных датчиков,

расположенных по всему объему $20 \times 100 \times 100 \text{ мм}^3$ испытательного пространства: по 13 датчиков на высотах: 1, 5, 10, 15, 20 мм (рисунок 3.14з).

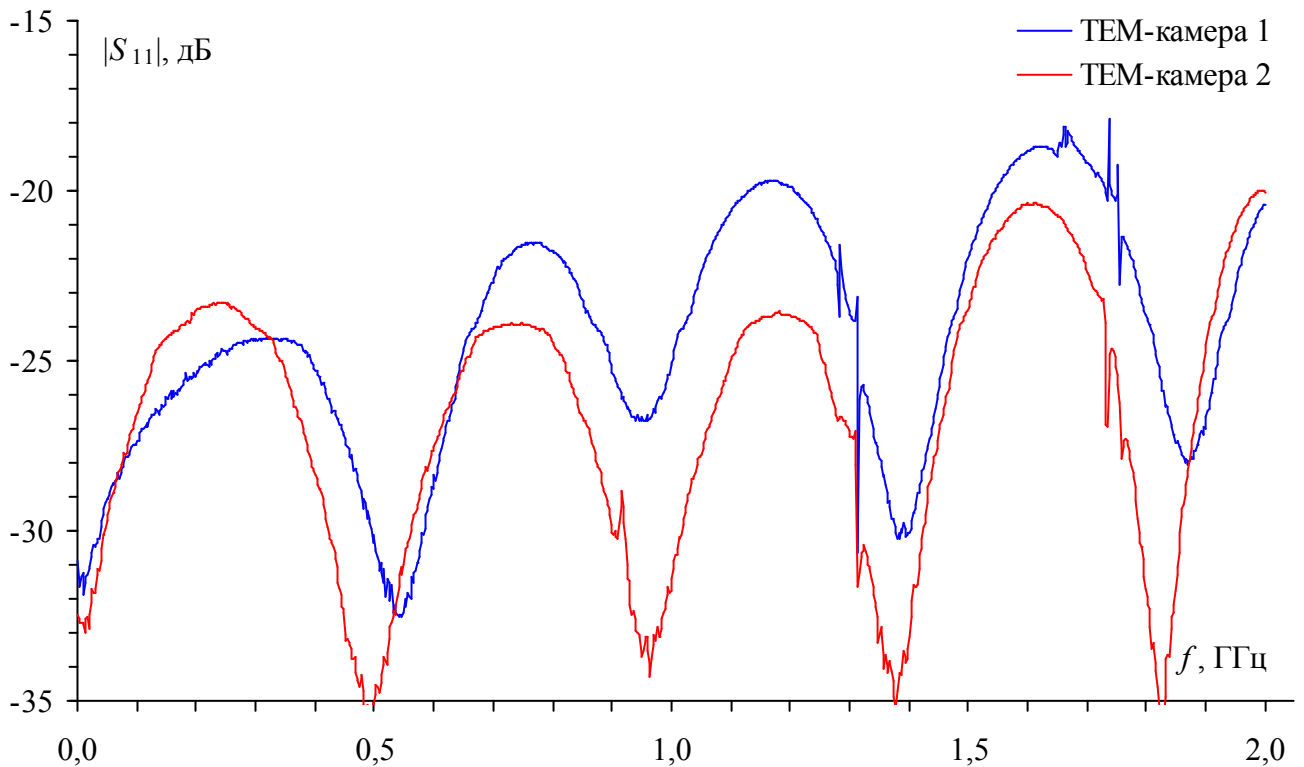


Рисунок 3.13 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$

для первого и второго экспериментальных макетов ТЕМ-камеры с испытательным столом

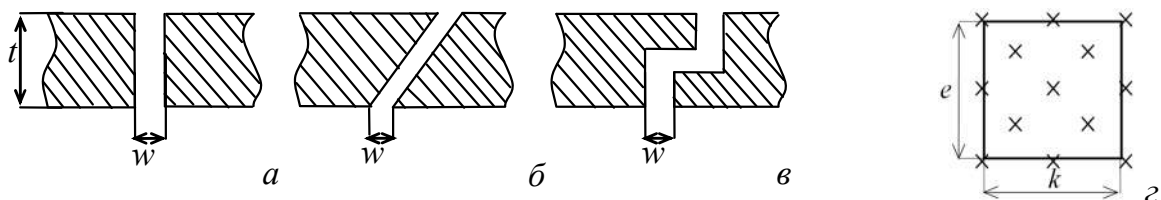


Рисунок 3.14 – Формы граней испытательного стола с нижней стенкой корпуса ТЕМ-камеры: под углами 90° (а), 45° (б), ступенчатая (в). Расположение датчиков электрического поля на испытательном столе внутри камеры и резисторов в щели (г)

Выполнено моделирование ЭЭ для трех форм граней (рисунки 3.14а–в) испытательного стола. Получено более 200 частотных зависимостей ЭЭ в диапазоне частот до 3 ГГц. В центре камеры на расстоянии 1 мм от стола, в диапазоне частот до 2 ГГц, при фаске испытательного стола 45° ЭЭ составила не менее 42 дБ, тогда как при ступенчатой грани – 33 дБ, а с прямым углом – 31 дБ. На расстоянии 20 мм от испытательного стола, при фаске 45° ЭЭ составила не менее 19 дБ, при ступенчатой грани – 11 дБ, с прямым углом – 12 дБ. Наихудшие значения

наблюдались непосредственно возле щели (0,1 мм) между испытательным столом и корпусом камеры. На расстоянии 20 мм от щели, при фаске испытательного стола 45° значения ЭЭ составляли не менее 5 дБ, при ступенчатой грани – минус 1 дБ, с прямым углом – 0 дБ.

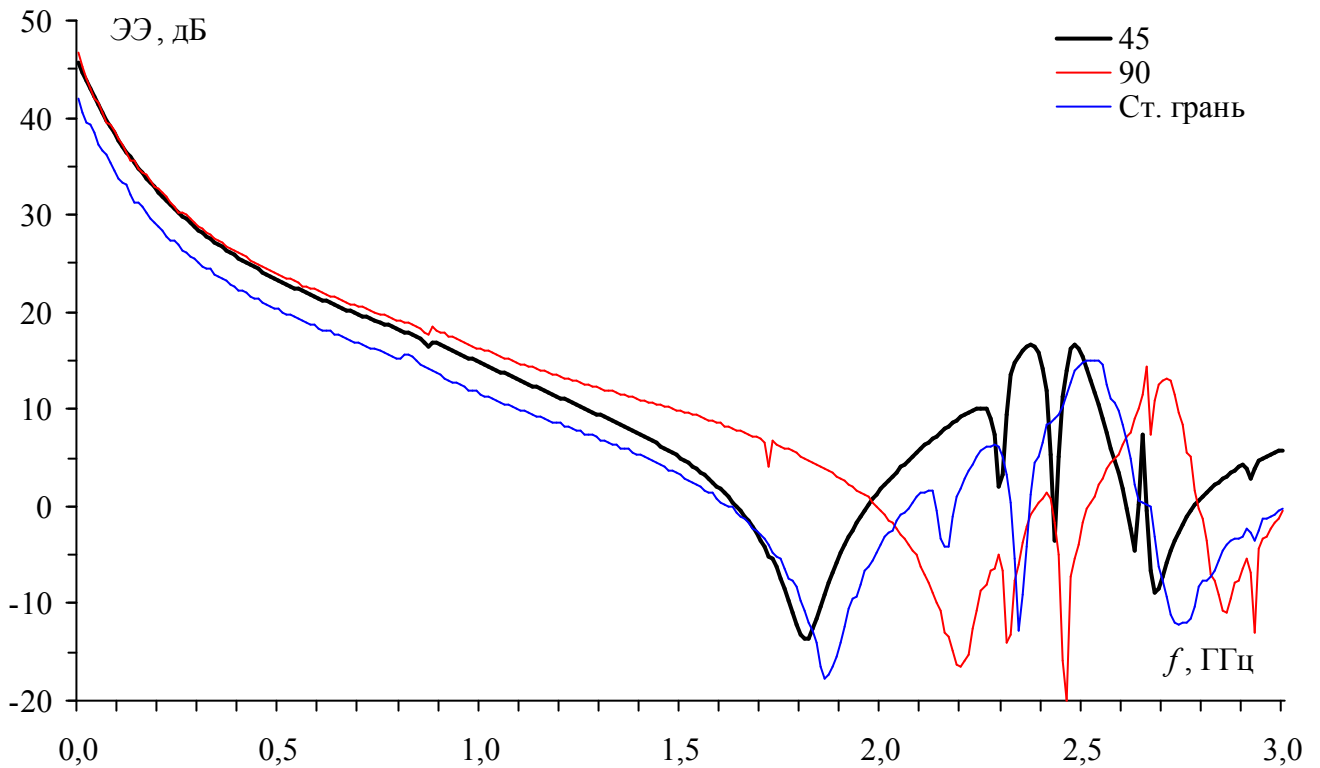
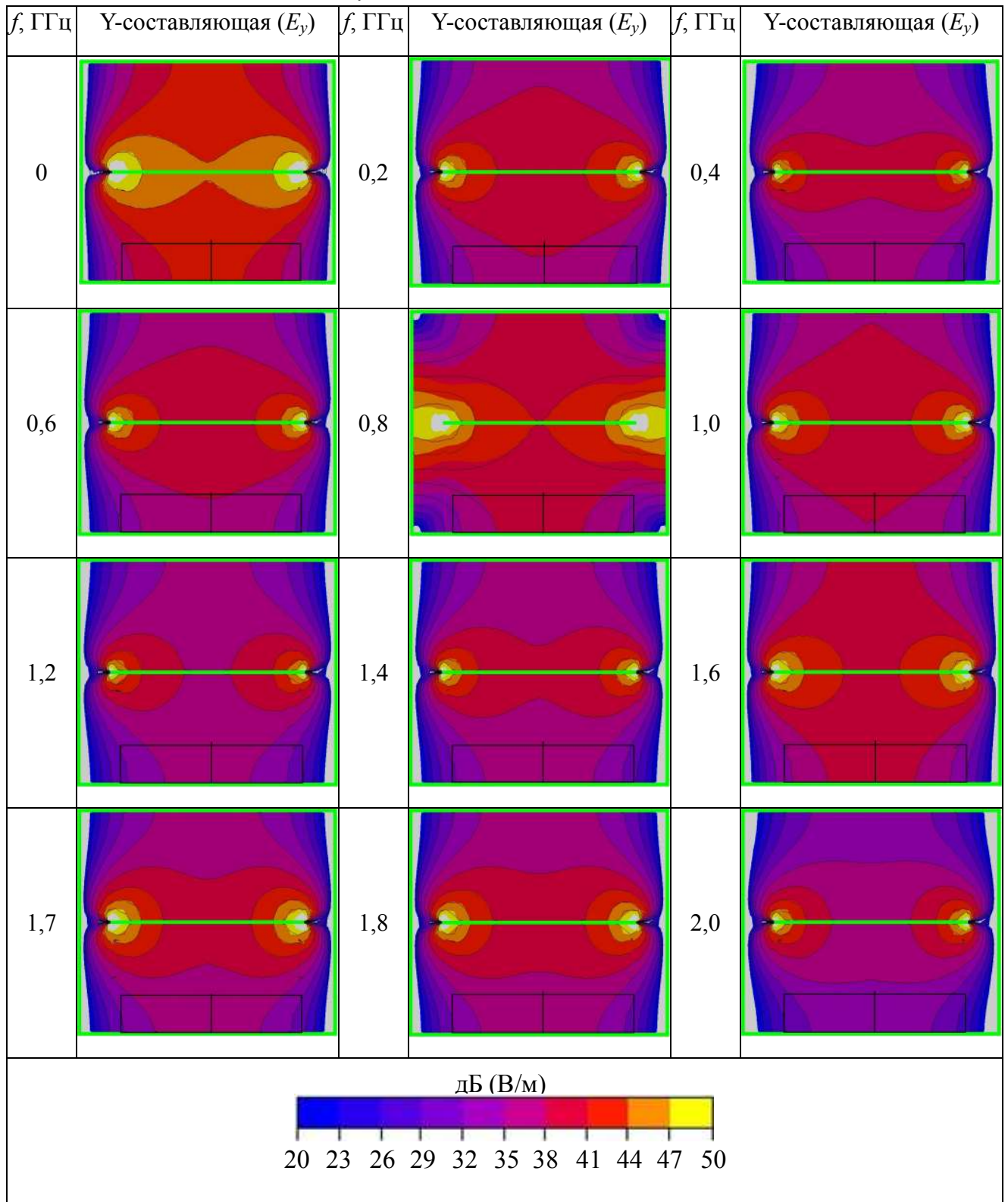


Рисунок 3.15 – Наихудшие частотные зависимости ЭЭ корпусом ТЕМ-камеры с 45° , 90° и ступенчатой гранями ИС, в местах расположения датчиков 6, 8, 12 соответственно

На рисунке 3.15 показаны наихудшие частотные зависимости ЭЭ, для трех разных граней испытательного стола, при расположении датчиков поля в 1 мм от щели между испытательным столом и корпусом ТЕМ-камеры. Обобщающий анализ всех полученных зависимостей показал, что ЭЭ корпусом ТЕМ-камеры с испытательным столом под углом 45° более предпочтителен по сравнению с остальными формами граней испытательного стола, поэтому при сборке макета сделана фаска под угол 45° на гранях выреза корпуса камеры и испытательного стола. Вычислены уровни и представлены диаграммы (таблица 3.1) напряженности электрического поля в центре внутри ТЕМ-камеры, при возбуждении ЭМП внутри камеры гауссовым импульсом с параметрами $U_m=1$ В, $\tau_H=0,81$ нс. Из таблицы 3.1 видно, что в диапазоне частот до 2 ГГц неравномерность напряженности электрического поля для Y-составляющей, в центре зоны испытания 20×100 мм² (выделена черной рамкой) не превышает ± 6 дБ.

Таблица 3.1 – Диаграммы $|E_y|$ внутри ТЕМ-камеры

Таким образом, по результатам моделирования получены оптимальные геометрические параметры и соотношения для ТЕМ-камер с волновым сопротивлением 50 Ом, с $K_{СВН} \leq 1,15$, в рабочем диапазоне частот до 1 и 2 ГГц, при высоте ИО 40 и 20 мм соответственно. ТЕМ-камера в диапазоне частот до 1 ГГц отличается увеличенными в два раза геометрическими

параметрами ($w=212,4$ мм; $a=276,2$ мм; $b=240,5$ мм; $L=281,5$ мм; $L_1=176,6$ мм; $L_3=280,5$ мм; $X=1,25$ мм) при этом максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 23,5 дБ.

Разработана ТЕМ-камера, на внутренние боковые стенки которой нанесен тонкий слой мюметалла, для расширения диапазона рабочих частот. В качестве исходной модели выбрана ранее полученная электродинамическая модель камеры с соотношением сторон $a/b=a'/b'=1,15$ (рисунок 3.16а). В программе CST MWS вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ (рисунок 3.17), при разных толщинах $t=0,1, 0,35$ мм и ширинах $b_{um}=10, 30, 120$ мм мюметалла (рисунок 3.16б). В качестве мюметалла выбран CARPENTER Нуми 800 (Ю. Корея) толщиной 0,1 мм (Ni 80%, Mo 5% Fe 14%) [251], $\mu_r=400000$, $\sigma=1,613$ МСм/м, $\rho=8747$ кг/м³, тепловой проводимостью 34,59 Вт/К/м. Характеристики реального мюметалла учтены в модели.

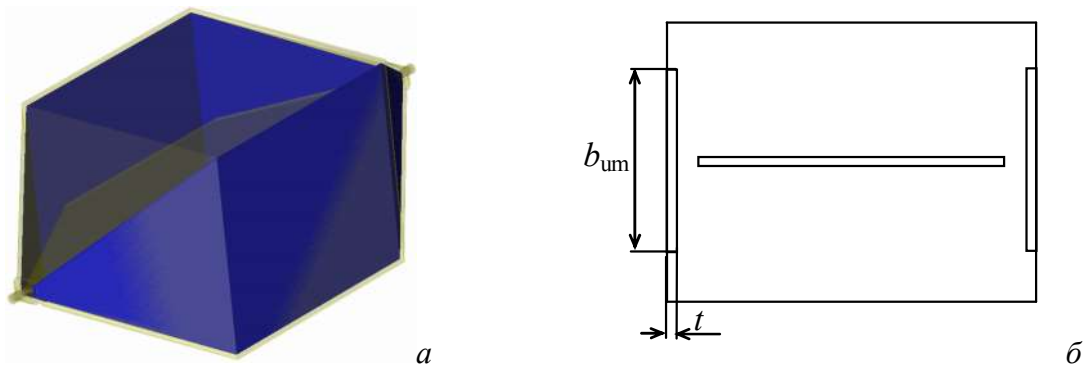


Рисунок 3.16 – Модель (а) ($b_{um}=120$ мм, $t=0,1$ мм) и поперечное сечение ТЕМ-камеры (б) с мюметаллом CARPENTER Нуми 800 на внутренних боковых стенках корпуса камеры

Вычисленные методом ТЛМ и измеренные прибором Р2М-40 частотные зависимости $|S_{11}|$ (рисунок 3.17) и $|S_{21}|$ (рисунок 3.18), в частотном диапазоне до 3 ГГц, для ТЕМ-камеры с мюметаллом толщиной $t=0,1$ мм и без него. Из рисунка 3.17 видно, что на частотах 2,1 ГГц, 2,6 ГГц и 2,8 ГГц имеется серия резонансов для камеры, не покрытой изнутри мюметаллом. Соответственно на частоте 2,1 ГГц и выше использование подобной ТЕМ-камеры нецелесообразно. При покрытии внутренних боковых стенок мюметаллом, амплитуда высших мод на частотах резонансов значительно затухает и значение $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 3 ГГц не превышает минус 15 дБ. Однако, мюметалл оказывает значительное влияние на частотную зависимость $|S_{21}|$, который плавно затухает с ростом частоты и на частоте 2 ГГц составляет минус 6 дБ, а в диапазоне частот от 2 до 3 ГГц затухание возрастает и на частоте 2,9 ГГц достигает максимума минус 12 дБ. Проводить измерения свыше 3 ГГц нецелесообразно, поскольку моделирование показало (результаты не приведены), что $|S_{21}|$ достигает минус 26 дБ на частоте 3,8 ГГц и минус 48 дБ на частоте 4,15 ГГц. При использовании ТЕМ-камеры с мюметаллом на внутренних боковых стенках камеры в диапазоне частот до 3 ГГц необходимо

учитывать вносимое затухание. Также, вычислены значения частотных зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ для разных толщин $t=0,1; 0,35$ мм мюметалла (результаты не приведены). Анализ данных зависимостей показал, что толщина мюметалла не оказывает значительного влияния на частотные характеристики камеры, соответственно толщина мюметалла может быть минимальна и нанесена на внутренние боковые стенки при помощи термического осаждения.

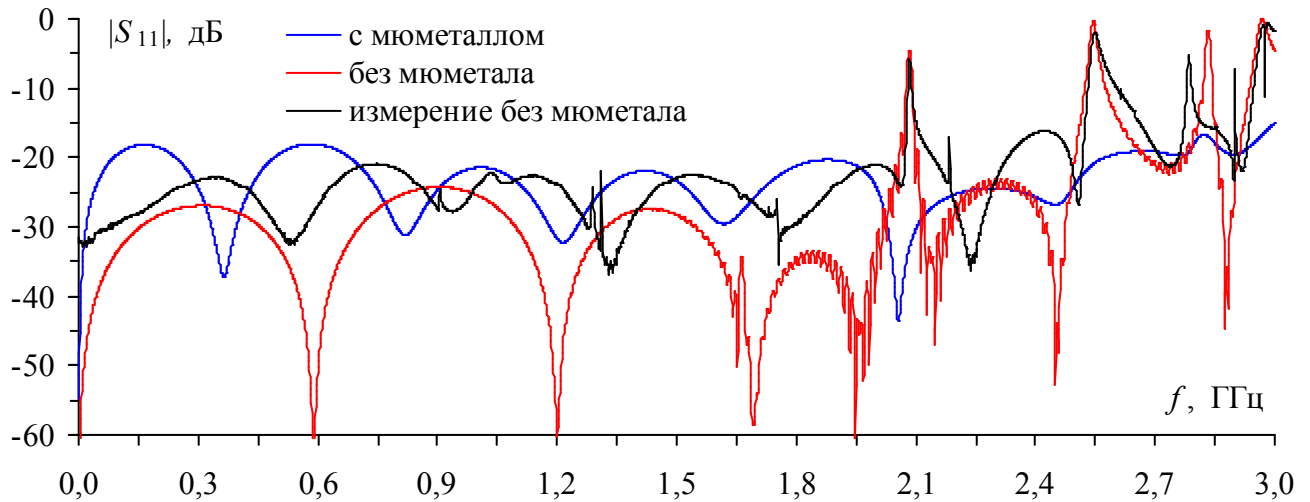


Рисунок 3.17 – Вычисленные методом TLM и измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры с покрытием из мюметалла толщиной $t=0,1$ мм и без него

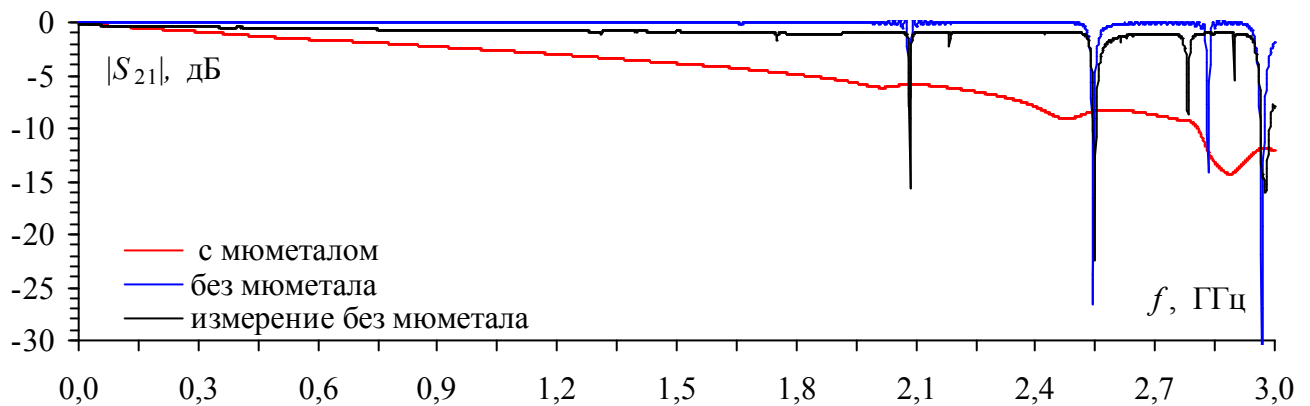


Рисунок 3.18 – Вычисленные методом TLM и измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ ТЕМ-камеры с покрытием из мюметалла толщиной $t=0,1$ мм и без него

Создана модель (рисунок 3.19а) и разработаны миниатюрные ТЕМ-камеры для измерения ЭЭ материалов (рисунок 3.19б) и БО (рисунок 3.19в), в более широком диапазоне частот до 7 ГГц с высотой ИО, не превышающим 5 мм. Данные камеры необходимы для проведения измерений в более широком диапазоне частот, с воздействием высоких амплитуд напряженности электрического поля на БО, представляющий собой, например суспензию

изолированных митохондрий печени мышей, а также измерение ЭЭ материалов по методике, описанной национальным бюро стандартизации США [252]. Выполнен анализ соотношений сторон по вышеописанной методике $a/b=a'/b'=1,425$, при уменьшении высоты ИО в 4 раза ($z_1=5$ мм). Выполнена оптимизация и вычислены оптимальные геометрические параметры камеры: $w=30,1$ мм; $a=34,58$ мм; $b=30,1$ мм; $L=35,2$ мм; $L_1=22,2$ мм; $L_3=35,1$ мм; $X=1,37$ мм (остальные параметры соответствуют геометрическим параметрам для вышеизложенной камеры). Отличием разработанных миниатюрных ТЕМ-камер от существующих является их область применения, а также то, что они изготовлены, применяя современные технологии печати из пластика с последующими гальваническим и экранирующим покрытиями корпуса и центрального проводника.

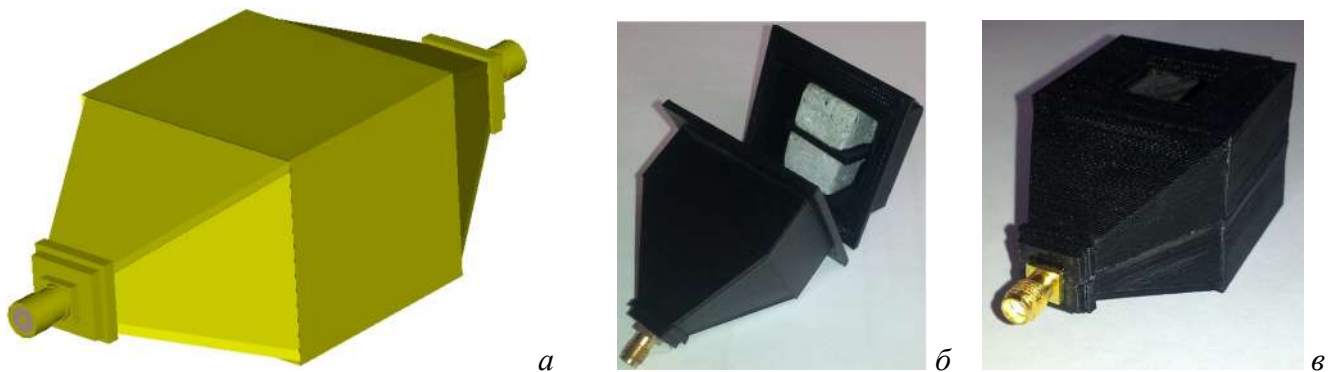


Рисунок 3.19 – Миниатюрная модель ТЕМ-камеры (а) и изготовленные для измерения ЭЭ материалов (б) и воздействия ЭМП на БО (в)

Поскольку отличием камер, предназначенных для измерения ЭЭ материалов и воздействия ЭМП на БО, является конструкция, то электродинамическая модель для обоих видов камер, одна. Вычисленная частотная зависимость $|S_{11}|$ для миниатюрной ТЕМ-камеры приведена на рисунке 3.20. Видно, что максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 20 дБ, в диапазоне частот до 7 ГГц.

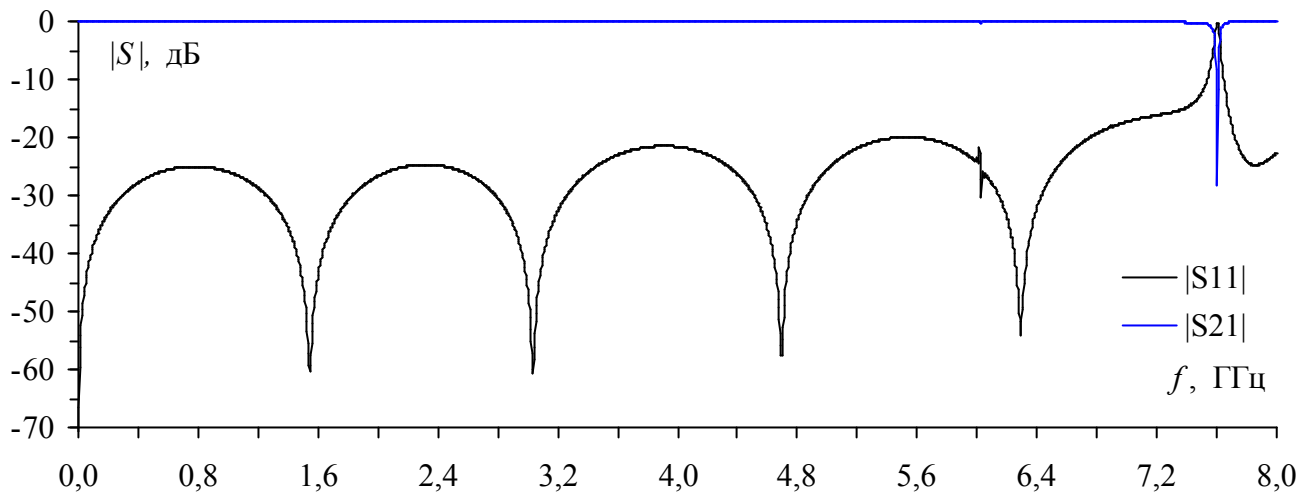


Рисунок 3.20 – Вычисленные методом TLM частотные зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ и передачи $|S_{21}|$ для миниатюрной модели ТЕМ-камеры

Таким образом, предложен подход к вычислению и оптимизации геометрических размеров ТЕМ-камеры, позволяющий учитывать реальные неточности, возникающие при проектировании и создании сложных форм конструкций волноводов из металла. Представлены созданная ТЕМ-камера (с максимальным значением $|S_{11}|$, по результатам измерений, минус 20 дБ ($K_{СВН} < 1,22$), в диапазоне частот до 2 ГГц, при максимальной высоте ИО 20 мм) и разработанные камеры для диапазона частот до 3 ГГц и 7 ГГц. Повышение диапазона частот в первом случае выполнено без изменения геометрических параметров и достигается за счет нанесения мюметалла на внутренние боковые стенки камеры, а втором – за счет уменьшения в 4 раза геометрических размеров ТЕМ-камеры. Также, для увеличения полезного объема камеры, под высоту ИО до 40 мм, размеры ТЕМ-камеры могут быть линейно увеличены в два раза, но при этом полоса рабочих частот ТЕМ-камеры уменьшается до 1 ГГц.

Выполнено сравнение разработанной ТЕМ-камеры с ближайшим аналогом, ТЕМ-камерой фирмы IFI CC-110EXX, имеющей диапазон рабочих частот до 2 ГГц, при $K_{СВН} < 1,25$ и максимальных габаритах ИО $2,3'' \times 2,3'' \times 0,7''$ ($58,4 \times 58,4 \times 17,8 \text{ мм}^3$), с расстоянием между корпусом и проводником 60 мм [117]. Разработанная ТЕМ-камера имеет схожие характеристики, однако отличается меньшим $K_{СВН} < 1,22$ и увеличенным объемом ($100 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$). Также, сравнивались (рисунок 3.21) частотные зависимости разработанной (измеренные) и стандартной FCC-ТЕМ-JM1 [253] (электродинамическое моделирование из [129]) ТЕМ-камер для проведения испытаний на помехоэмиссии и помехоустойчивость, согласно IEC 61967-2 [99] и IEC 62132-2 [100].

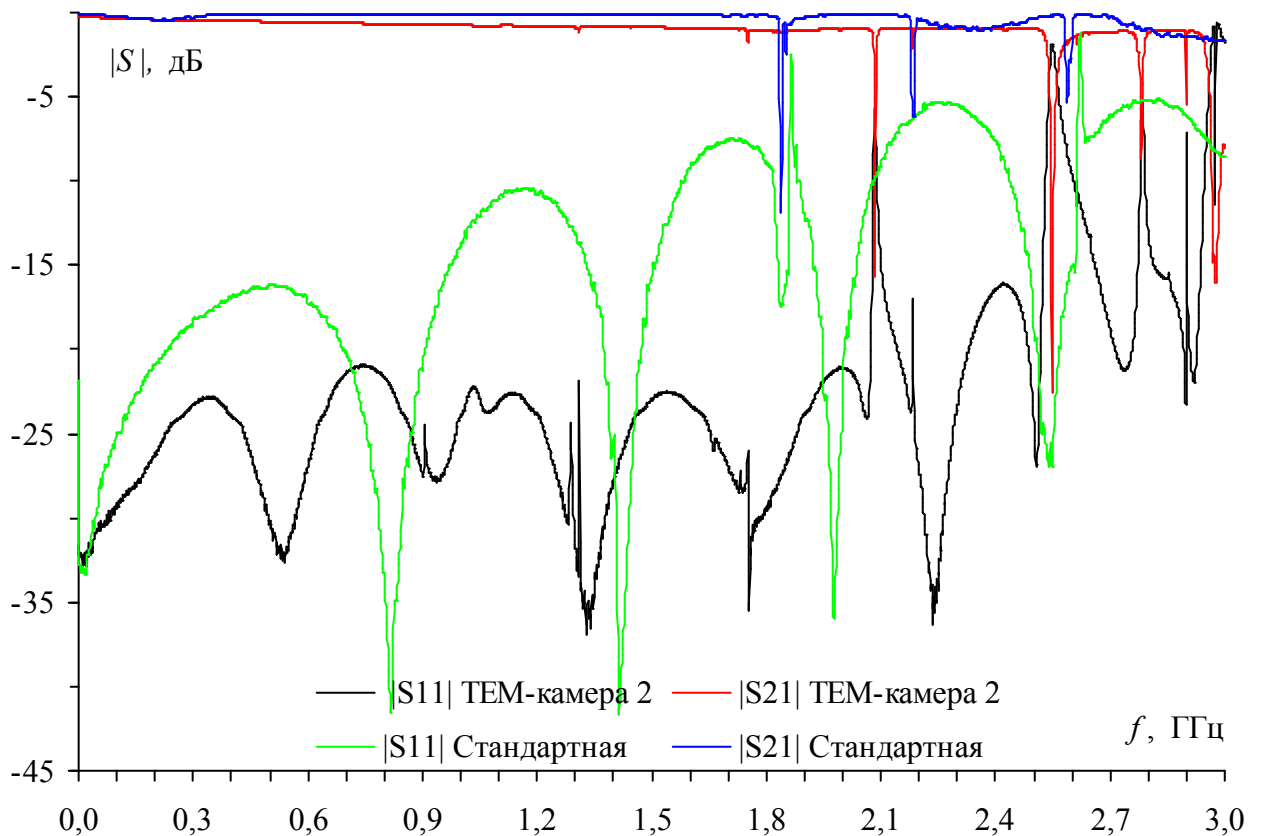


Рисунок 3.21 – Частотные зависимости $|S|$ параметров для разработанной ТЕМ-камеры (измерения) и стандартной (электродинамическое моделирование) FCC-TEM-JM1 из [129]

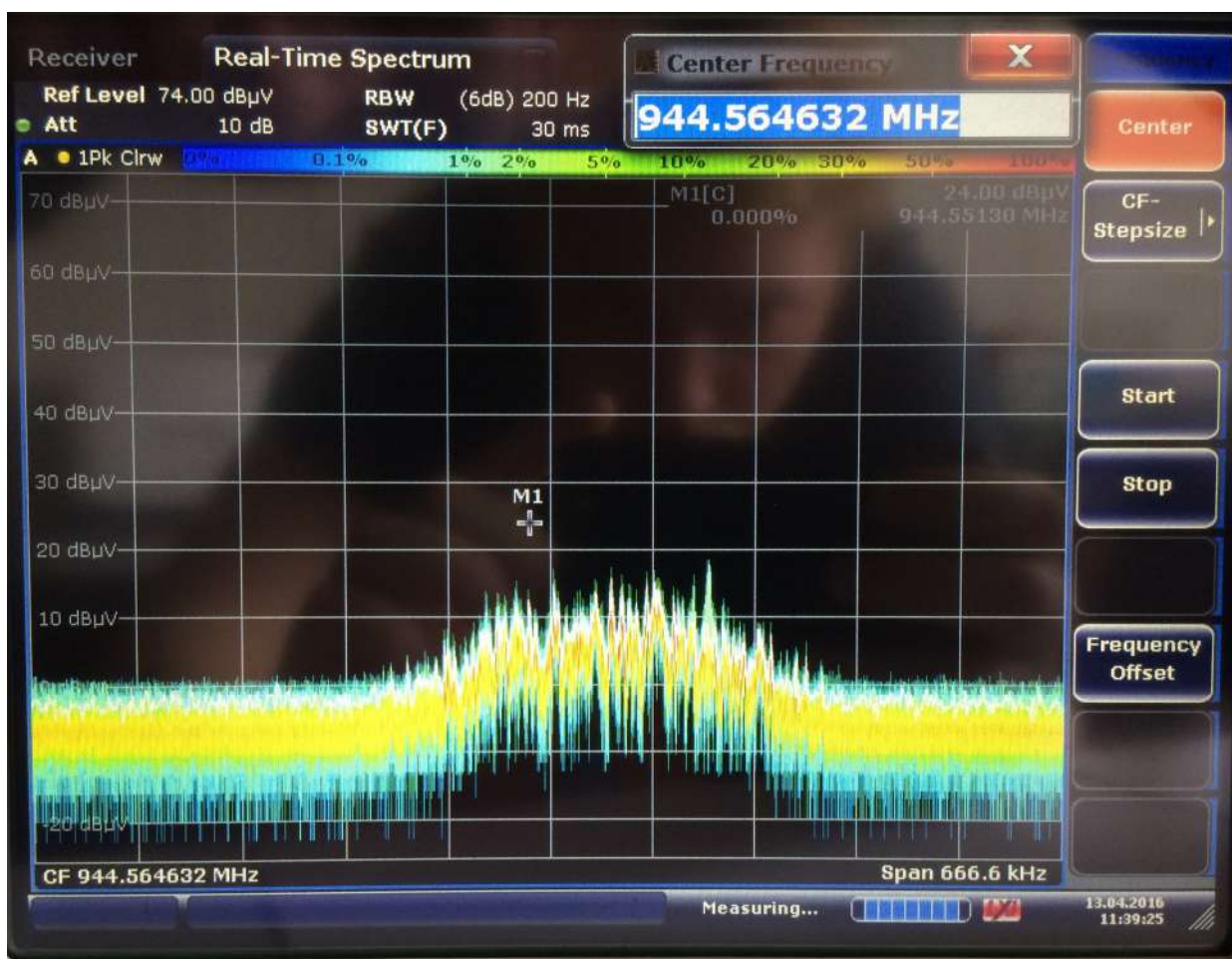
Из рисунка 3.21 видно, что для стандартной ТЕМ-камеры, граничная частота находится в пределах 1,87 ГГц, тогда как для разработанной – 2,1 ГГц. Также, модуль коэффициента отражения, в диапазоне частот до 1,7 ГГц для разработанной ТЕМ-камеры на 12,5 дБ ниже, чем для стандартной, даже с учетом того, что сравниваются измеренные и вычисленные значения.

3.1.3 Примеры использования

С помощью разработанной ТЕМ-камеры и измерительного приемника Rohde&Schwarz ESR (рисунок 3.22а), выполнено измерение помехоэмиссий сотового телефона модели SAMSUNG-I9250 (рисунок 3.22б). Видно, что на центральной частоте около 944,56 МГц, в полосе 222 кГц, измеряемый уровень не превышает 30 дБмкВ (с учетом включенного аттенюатора на 10 дБ). Таким образом, из сравнения существующих аналогов и разработанной ТЕМ камеры, можно предположить, что данные конструкторские решения, полученные при помощи методики оптимизации геометрических размеров, являются оптимальными для ТЕМ-камер в диапазоне частот до 2 ГГц.



a



б

Рисунок 3.22 – Измерение помехоэмиссий от сотового телефона SAMSUNG-I9250 в ТЕМ-камере (а), показания измерительного приемника (б)

Исследовано влияние импульсного ЭМП на функциональное состояние митохондрий печени мышей в ТЕМ-камере (рисунок 3.23). В качестве источника воздействия использовался генератор импульсного напряжения ГИН-1-1 (FIDTechnology) с регулируемой амплитудой напряжения от 700 до 1000 В, частотой повторения от 10 до 1000 Гц, временем нарастания 90 пс и длительностью (по половине амплитуды) импульса 300 пс. В качестве БО использовались

контрольные, облученные и ложно облученные суспензии митохондрий. Последние подвергались аналогичным манипуляциям, что и облученные, но без включения источника воздействия. Для каждого из режимов воздействия показатели были измерены в 6 повторностях. Значимость различия в показателях дыхания облученных и ложно облученных митохондрий оценивалась в программе StatSoft STATISTICA 6.0 с помощью U-критерия Манна–Уитни.



Рисунок 3.23 – Измерение влияние импульсного ЭМП на функциональное состояние митохондрий печени мышей в ТЕМ-камере

Суспензии изолированных митохондрий подвергались однократному воздействию 4000 пикосекундных импульсов с частотами повторения 10 Гц и 1000 Гц и напряженностью электрического поля 0,11 кВ/см и 0,17 кВ/см.

Показано (рисунок 3.24), что в режим воздействия 10 Гц, 0,11 кВ/см значимо влияет на снижение скорости потребления кислорода митохондриями. Скорость фосфорилирующего дыхания облучённых митохондрий оказалась в 1,5 раза ниже по сравнению с ложно облучёнными образцами.

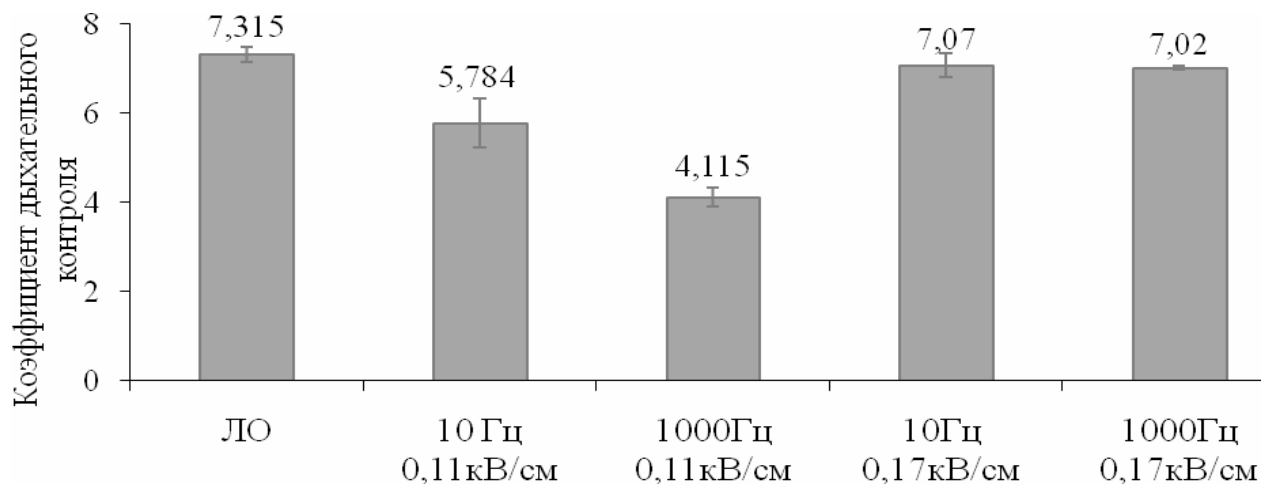


Рисунок 3.24 – Измерение влияния импульсного ЭМП на функциональное состояние митохондрий печени мышей в ТЕМ-камере

3.2 Устройства для совместных климатических и электромагнитных воздействий

В разделе описана разработка КЭК. Представлены описание, конструкция, облик, принцип действия и конструкция лабораторного макета КЭК, которая может быть применима для исследований и испытаний небольших объектов РЭС на совместные климатические и электромагнитные эмиссии и воздействия. Также, приведена методика исследований и испытаний ИО при помощи данной камеры.

3.2.1 Технические требования

Технические требования к КЭК разработаны, основываясь на стандартах по ЭМС для проведения натурных испытаний на помехоэмиссию IEC 61967-2 [99] и помехоустойчивость IEC 62132-2 [100] интегральных схем, с учетом введения дополнительной функции одновременного воздействия температуры и влажности воздуха на ИО. В качестве ИО выбрана ЭКБ, конкретно чип-компоненты, высота которых в большинстве случаев не превышает 5 мм. Высота ИО должна быть увеличена до 20 мм с целью применения камеры для биологических исследований, а именно возможности размещения внутри камеры чаши Петри со стандартными размерами (диаметр 50–100 мм, высота 15–20 мм). Степень жесткости испытаний при воздействии холодом на ЭКБ выбрана согласно среднему ряду жесткости не более минус $40 \pm 3^\circ\text{C}$, в соответствии с ГОСТ 28199–89 [254], при воздействии сухим (относительная влажность воздуха 50% при $+35^\circ\text{C}$) теплом при температуре $+125 \pm 2^\circ\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 28200–89 [255], при воздействии влажным теплом с температурой $40 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха $93^{+2}_{-3}\%$ в соответствии с ГОСТ 28201–89 [256]. Вышеперечисленные требования могут быть увеличены по ряду жесткости испытаний согласно

вышеописанным стандартам. Также, камера должна область циркуляцией воздушного потока через испытательный контейнер со временем работы при максимальной загрузке камеры не менее 96 ч. Применительно к ЭКБ данный диапазон температур увеличен в положительную и отрицательную стороны: от минус 50 до +150°C, с целью приближения работы ЭКБ к реальным условиям эксплуатации. ЭЭ камерой выбрана не менее 40 дБ в диапазоне частот до 37,5 ГГц согласно ГОСТ 50414-92 [257]. Частота увеличена до 40 ГГц согласно требованиям MIL-STD-461F [93] и AIAA S-121-2009 [258]. Волновое сопротивление выбрано 50 Ом с целью согласования контрольно-измерительных приборов (КИП) с ТЕМ-камерой. Коэффициент стоячих волн по напряжению (КСВН) не должен превышать 1,5 в частотном диапазоне от 150 кГц до 2 ГГц. Неравномерность напряженности электрического поля в зоне ИО не более чем ± 6 дБ. Разность составляющей сигнала между входом и выходом для помехозащитных фильтров не должна превышать $\pm 5\%$. Данные требования установлены согласно нормативным документам на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС [99, 100, 164].

ИО должен устанавливаться на одну из широких поверхностей ТЕМ-камеры. Подключение КИП и измерение характеристик ИО должно выполняться с помощью оборудования, подключенного через внутренний соединитель, в стенке камеры. Для СВЧ соединителей, расположенных на концах пирамидальных частей ТЕМ-камеры, рабочее напряжение должно быть не менее 300 В, сопротивление изоляции должно быть не менее 5 ГОм, а рабочий диапазон температур должен находиться в пределах от минус 55 до 155°C.

3.2.2 Конструкция и принцип работы

Основой создания КЭК является интеграция ТЕМ-камеры в климатическую камеру (рисунок 3.25 а) и повышение её ЭЭ от внешнего ЭМП. В результате подобной гибридизации и микропроцессорного (МП) управления двумя (внутренней и внешней) подсистемами создаётся, отслеживается и удерживается заданное температурное поле внутри ТЕМ-камеры. Внешняя подсистема имеет независимые модульные элементы нагрева и охлаждения, которые расположены на поверхности ТЕМ-камеры и обеспечивают равномерный нагрев/охлаждение её стенок. Внутренняя подсистема имеет две подподсистемы: одна из них обеспечивает заданную температуру, другая – влажность воздуха, циркулирующего при помощи компрессора через воздушные каналы, расположенные в углах ТЕМ-камеры. КЭК имеет внешний многослойный экранированный корпус с РПМ на поверхности, что позволяет повысить ЭЭ. Также КЭК имеет внешний датчик температуры и ЭМП, данные с которых передаются по оптоволоконному каналу связи МП системе управления. На жидкокристаллическом дисплее (ЖКД) пульта управления (ПУ) камерой отображается цифровая и графическая информация о температуре и влажности воздуха внутри ТЕМ-камеры, а также информация о внешнем ЭМП и температуре. С

помощью ПУ возможно также задать, отследить и настроить дополнительные параметры (режим работы, давление компрессора, поток воздушного охлаждения радиатора и многое другое).

КЭК имеет расположенную снизу автоматизированную съемную дверь (рисунок 3.25 б), на внутренней стороне которой расположен испытательный стол. На него помещается ИО и подключается к СВЧ соединителям. При необходимости используется ПП с припаянным на её поверхности ИО, согласно вышеописанным нормативным документам. После закрытия двери (её подъемом вверх) ИО оказывается внутри ТЕМ-камеры. КИП подключаются с внешней стороны двери к соединителям типа SMA (рисунок 3.25 в). При необходимости КЭК может быть оборудована для биологических исследований (рисунок 3.25 г), для этого испытательный стол может быть заменен на стол для электромагнитных исследований БО (рисунок 3.25 д). Внутри двери между испытательным столом и внешними соединителями КЭК включены помехозащитные фильтры, которые предотвращают попадание ЭМП на вход КИП. Дверь сделана съемной, что позволяет подключить ИО к КИП через разнотипные соединители, а также изменять их количество. СВЧ-генератор для возбуждения поперечной электромагнитной волны в ТЕМ-камере подключается сзади с внешней стороны КЭК.

Технические характеристики КЭК: КСВН $<1,25$; волновое сопротивление 50 Ом; верхняя граничная частота 2 ГГц; размеры ИО 20×100×100 мм³ (для совместных электромагнитных и климатических испытаний), 55×100×100 мм³ (для климатических испытаний); напряженность электрического поля <2 кВ/м; температурный диапазон от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$; стабильность температурного поля $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$; влажность воздуха внутри ТЕМ-камеры от 10 до 90%; ЭЭ >40 дБ в полосе частот до 40 ГГц.

Интерфейс связи с ИО – через соединители 24SMA-50-3-15/111 NE, D-Sub-9/25-f/m, micro USB, 4 клеммы питания. Интерфейс связи КЭК: 24SMA-50-3-15/111 NE (через многозвенные помехозащитные фильтры) – для ТЕМ-камеры с КИП; USB 2.0 – для рабочей станции со специализированным ПО. Интерфейс связи ТЕМ-камеры с СВЧ-генератором или нагрузкой – через соединитель 24SMA-50-3-15/111 NE. Дополнительные параметры: головной МП 32-бит ARM Cortex-A5-36 536 МГц, графический МП 32-бит ARM Cortex-A5-44 544 МГц [259], сенсорный ПУ с OLED 5".

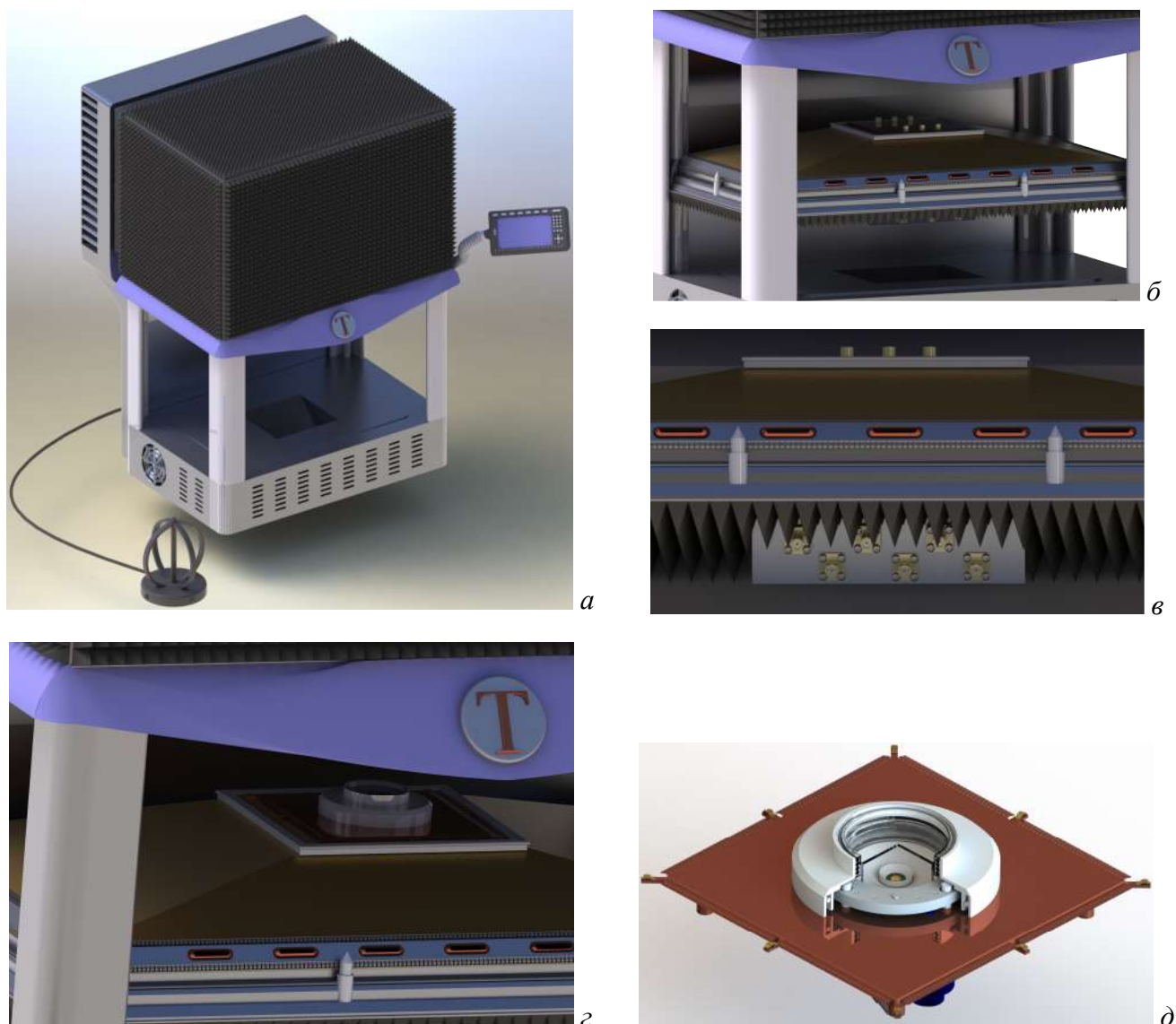


Рисунок 3.25 – Облик КЭК (а), вид с открытой дверью (б), вид двери со стороны соединителей (в), совместно (г) со столом для электромагнитных исследований БО (д)

3.2.2.1 Устройство для проведения испытаний в области радиотехники

КЭК (рисунок 3.26) состоит из экранирующего корпуса 1, радиаторного блока 2, ПУ 3 на гибком металлическом шланге 4, экранирующей юбки 5, испытательного стола 6, расположенного на съёмной двери 7 на червячном подъёмнике 8, защитных опорных стоек 9, внешнего датчика температуры и ЭМП 10 и блока системы управления 11 климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера 12 (рисунок 3.27).

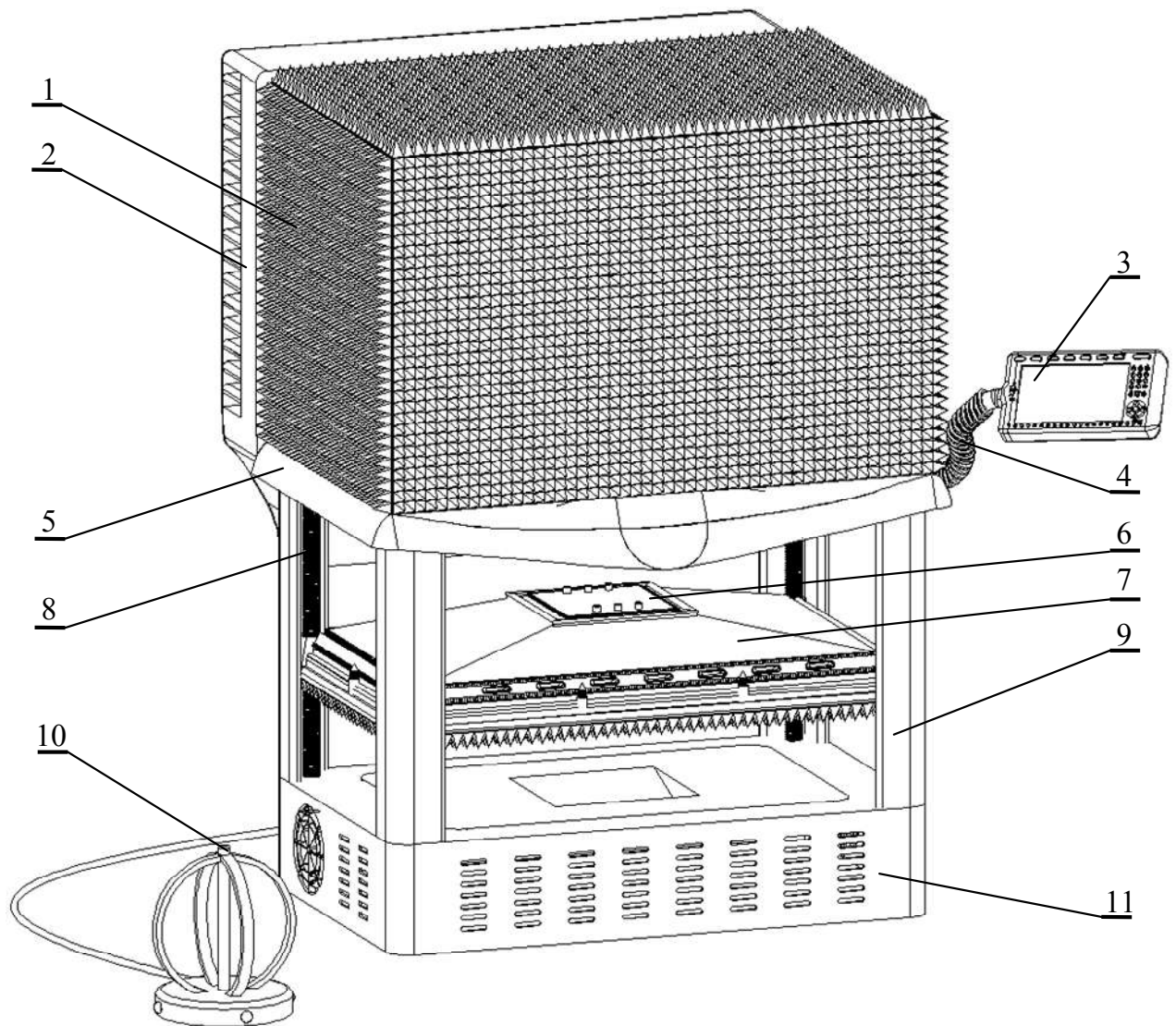


Рисунок 3.26 – Изометрический вид КЭК

Система управления климатическими воздействиями (рисунок 3.27) включает в себя внутреннюю 13 и внешнюю 14 подсистемы под управлением МП 15 с программной реализацией пропорционально интегрально дифференцирующего (ПИД) регулятора, ПУ 3 с графическим МП 16, ЖКД 17, блоком кнопок и сенсорного управления 18, схемы слежения и контроля за температурами подсистем 19, сетевой блок питания 20 с кнопкой включения 21 на ПУ 3, автономный блок питания 22, драйверы с шаговыми электродвигателями 23 для червячных подъёмников 8 и замков 24 съёмной двери 7, а также схемы интерфейса для подключения внешнего персонального компьютера (ПК) 25 через Ethernet модуль 26. В схемы стандартного включения головного 15 и графического 16 МП входят энергонезависимая память и запоминающие устройства с произвольной выборкой 27. Внешняя 14 подсистема состоит из модулей 28, которые располагаются между внешней поверхностью испытательного контейнера 12 и поверхностью внутренней оболочки экранирующего корпуса 29.

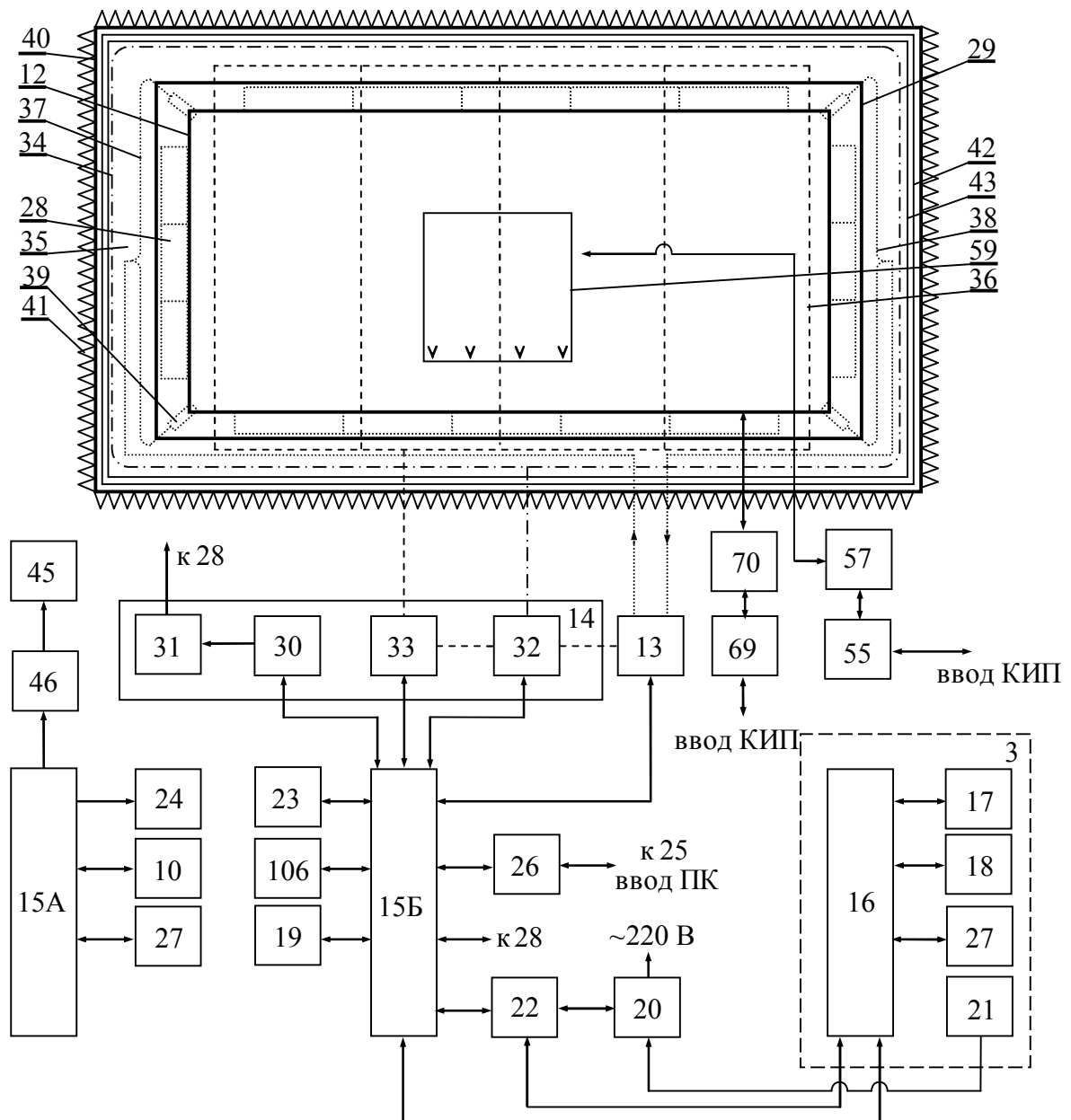


Рисунок 3.27 – Структурная схема устройства

для управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера

Модули 28 содержат элемент Пельтье (ЭП), плоский нагревательный элемент (ПЭН), датчики температуры, информация с которых поступает непосредственно в МП 15, а управление элементами осуществляется сигналами широтно импульсной модуляции (ШИМ) от группы микроконтроллеров 30, через силовые электронные модули (H-мост) 31. Охлаждение модулей производится посредством активной 32 и пассивной 33 систем охлаждения. Активная 32 система охлаждения содержит холодильную машину, теплообменник (испаритель) 34, которой располагается в полости 35 экранирующего корпуса, а пассивная 33 система выполнена замкнутым контуром из полых металлических трубок 36, в которых циркулирует воздушный поток посредством воздушного компрессора, тем самым

обеспечивается необходимая рабочая температура модулей, а также заданная температура экранирующего корпуса. Внутренняя 13 подсистема климат контроля содержит воздушную магистраль входящего 37 и исходящего 38 воздушных потоков из испытательного контейнера 12 с воздушными электрическими вентилями 39, испаритель, парогенератор, накопитель с ЭП и ПЭН элементами, датчиками температуры, влажности и давления воздуха, рециркуляционный вентилятор и компрессор для циркуляции воздуха через испытательный контейнер 12.

Экранирующий корпус выполнен в виде прямоугольного параллелепипеда с двухслойной оболочкой, изготовленной из металлического листового материала с высокой теплопроводностью (не менее $200 \text{ Вт/м} \times \text{К}$) и электропроводностью (не менее $\sigma = 37 \times 10^6 \text{ См/м}$), и содержит внешнюю оболочку 40, на внешней поверхности которой располагается РПМ 41, и внутреннюю оболочку 29. В полости 35 между внутренней 29 и внешней 40 оболочками располагаются экранирующий слой из лент магнитомягких сплавов 42, теплоизолирующий слой 43, теплообменник (испаритель) внешней активной климат системы 34, воздушная магистраль внутренней климат системы входящего 37 и исходящего 38 воздушных потоков испытательного контейнера. Испытательный контейнер 12 выполнен в виде ТЕМ-камеры из металлического материала с высокими электрической и тепловой проводимостями.

Внешний датчик 10 (рисунок 3.27) температуры и ЭМП выполнен в виде отдельного устройства и содержит цифровые датчики температуры и ЭМП. Датчик ЭМП выполнен из антенн E и H составляющих поля, сигнал с каждой из которых через входной контур подаётся на собственный логарифмический усилитель и затем оцифровывается контроллером. В контроллер также подходит сигнал от цифрового температурного датчика. Информация о температуре и ЭМП от контроллера подаётся на преобразователь оптоволоконной связи, и происходит передача информации в блок управления климатическими воздействиями, в частности на МП 15, которая при необходимости отображается на ЖКД 16.

Радиаторный блок 2 (рисунок 3.28) выполнен из металлического материала с высокой теплопроводностью (не менее $200 \text{ Вт/м} \times \text{К}$), имеет закрытые охлаждающие ребра 44, через которые циркулирует воздушный поток посредством четырех вентиляторов 45 с собственной схемой управления 46. Также радиаторный блок имеет экранированные полости для размещения в них электрических связей 47 и элементов силовой электроники 48, внутренней и внешней подсистем системы управления климатическими воздействиями 49. Между радиаторным блоком и экранирующим корпусом имеются, обеспечивающие жесткость конструкции, полые экранирующие трубы из проводящего материала, в которых располагаются электрические связи 50, воздушные магистрали 51 и трубы теплообменника 52 внутренней и внешней подсистем системы управления климатическими воздействиями.

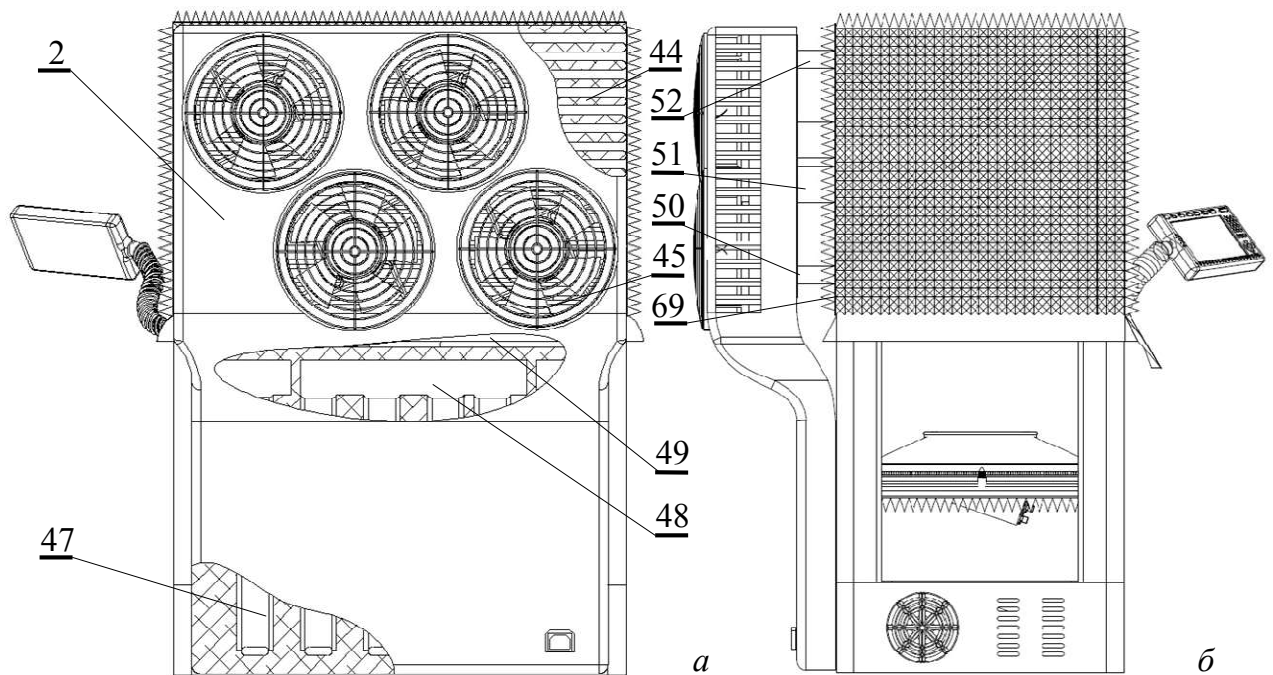


Рисунок 3.28 – Вид сзади (а) и вид слева (б) КЭК

Съемная дверь 7 (рисунок 3.29) располагается на червячных подъемниках 8, которые могут полностью вручную выкручиваться, при этом дверь может при необходимости полностью сниматься. Дверь выполнена из металлического проводящего материала с высокой тепло- и электропроводностью. Внутренняя 53 и внешняя 54 стенки двери при её закрытии образуют оболочку замкнутого прямоугольного параллелепипеда экранирующего корпуса 1. На внешней стороне внешней стенки располагаются РПМ 41 и соединители электрического ввода 55 для КИП 56. В полости между внутренней 53 и внешней 54 стенками располагаются материалы аналогичные тем, что используются в экранирующем корпусе, и помехозащитные фильтры 57 электрического ввода, а также часть контура внешней пассивной 36 системы охлаждения, выполненной из металлических полых трубок, по которым циркулирует воздушный поток. На внутренней поверхности съемной двери 7 располагается испытательный стол 6 (рисунок 3.31), который соответствует размерам ПП из нормативных документов [99, 100] и имеет электрические соединители 58 внутри испытательного контейнера 12, расположенные на испытательном столе 6 для соединения с ИО 59 и электрические соединители снаружи 55, расположенные на защитной крышке 60 для подключения КИП 56. Между испытательным столом 6, на который помещается ИО 59 и внешней стороной внутренней стенки двери 53 располагаются модули 28 внешней подсистемы климат управления. По периметру испытательного стола припаяны экранирующие 61 и герметизирующие 62 прокладки. Жесткость конструкции двери обеспечивается за счёт основания 63, которое представляет собой раму из металлического проводящего материала с треугольным поперечным сечением. По

периметру рамы имеются прорези для экранирующих 64 и герметизирующих 65 прокладок и вставок, а также полые цилиндрические выступы для винтовых стержней замка 66. В углах основания рамки имеются втулки, выполненные в форме пирамиды с резьбовым отверстием для червячных подъемников 67.

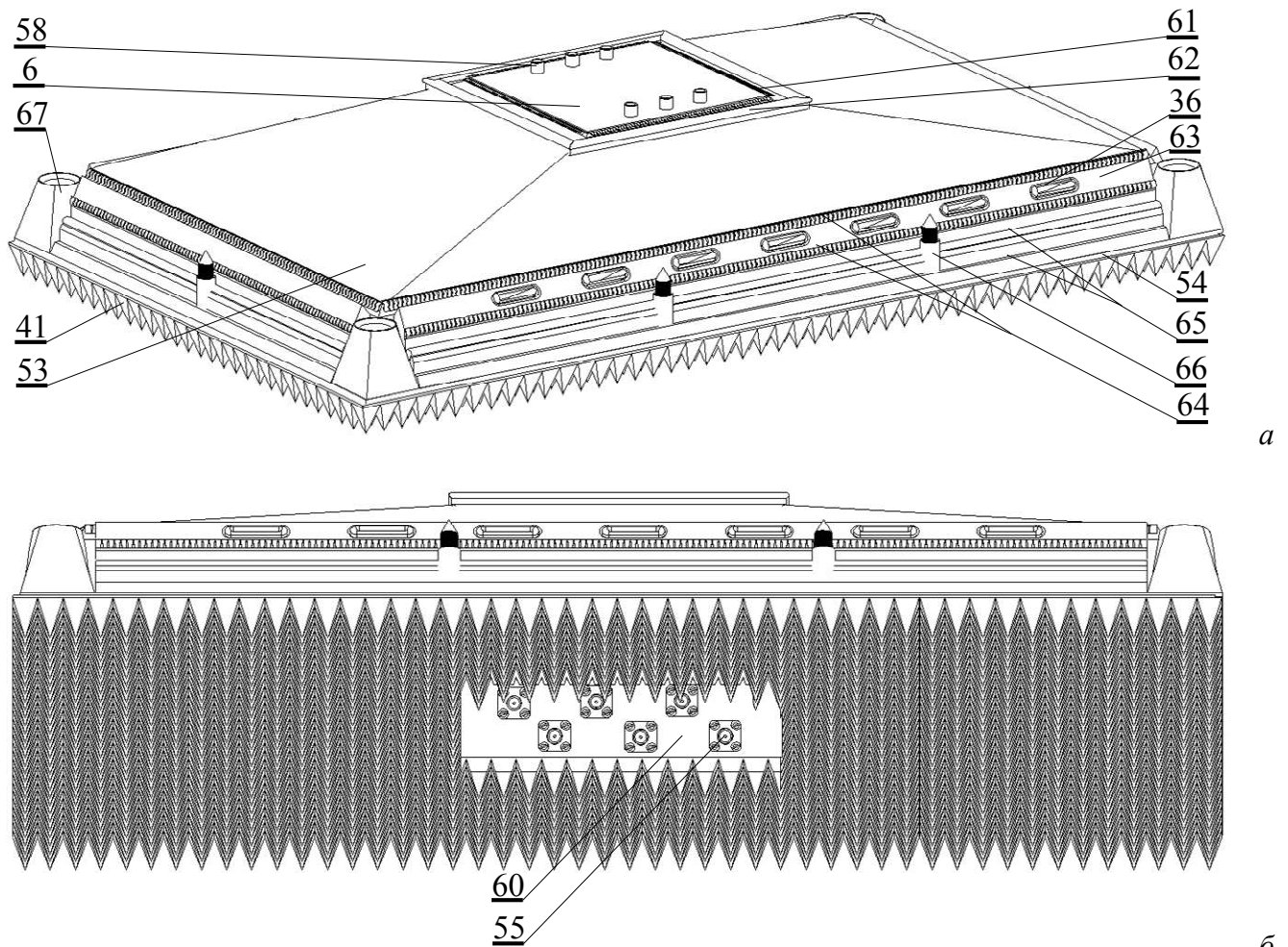


Рисунок 3.29 – Изометрический вид сверху съемной двери (а)
и вид спереди модуля электрического ввода (б)

Принцип работы КЭК заключается в следующем. ИО 59 помещается на испытательный стол 6 и подключается к соединителям 58. При необходимости испытательный стол заменяется на ПП, на которой располагается ИО, например интегральная микросхема. После закрытия двери, ИО 59 оказывается внутри испытательного контейнера 12. Возбуждение ЭМП внутри испытательного контейнера, выполненного в виде ТЕМ-камеры, происходит при помощи генератора 68, подключенного к коаксиальному соединителю 69, через СВЧ кабель 70, расположенный внутри камеры. Равномерность ЭМП обеспечивается при помощи определенных геометрических размеров поперечных сечений корпуса и центрального

проводника ТЕМ-камеры. Измерение помехоэмиссии производится аналогично, при включении к коаксиальному соединителю 69 измерительного приемника.

Таким образом, с помощью КЭК возможно проведение исследования и испытания объекта, представляющего собой отдельный компонент или небольшое устройство в целом, на ЭМС с одновременным контролируемым воздействием климатических условий окружающей среды, в частности, испытаний на стойкость объекта к совместным воздействиям контролируемых электромагнитного и температурного полей внутри испытательного контейнера, а также измерения тепловых эмиссий при электромагнитном воздействии или измерения тепловых и электромагнитных эмиссий от объекта испытания, находящегося при заданном значении влажности воздуха внутри испытательного контейнера камеры.

3.2.2.2 Устройство для проведения исследований в области биомедицины

КЭК для биологических исследований основана на вышеописанной КЭК для РЭС, но отличается конструктивным исполнением испытательного стола 6 с предметным столом 71 для БО, расположенным на съёмной двери 8 (рисунок 3.30). Несколько отличается схемотехническая часть устройства управления. Кроме того, добавлено устройство видеонаблюдения за исследуемым БО.

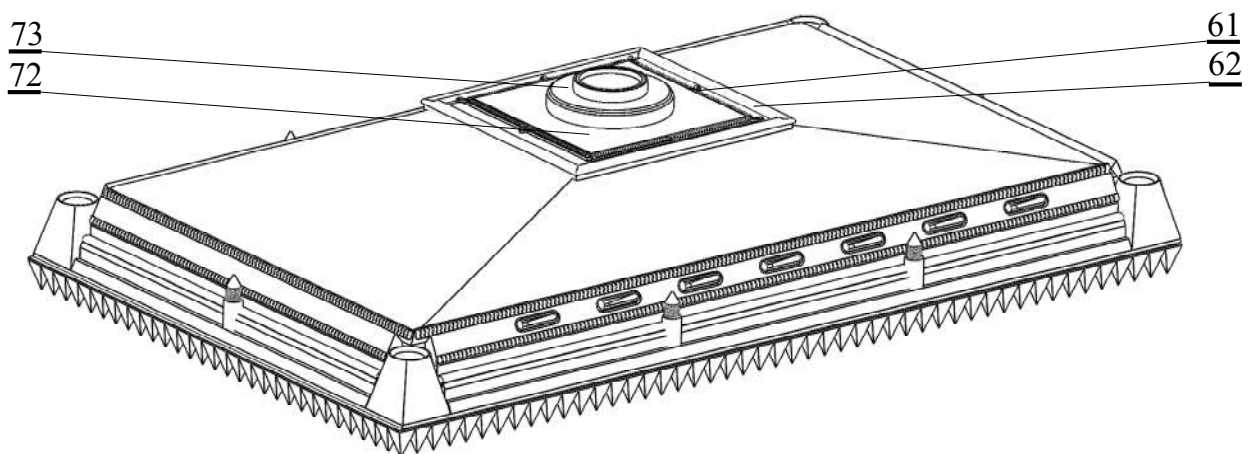


Рисунок 3.30 – Изометрический вид сверху съемной двери со столом для БО

Стол для электромагнитных исследований БО (рисунок 3.31) включает основание 72, выполненное в виде металлической плиты толщиной 2 мм, которая соответствует размерам $100 \times 100 \text{ мм}^2$. На поверхности основания (рисунок 3.31а) расположен корпус цилиндрической формы 73 из неметаллического материала. Цилиндрическая форма корпуса выбрана из проведенного анализа частотной зависимости $|S_{11}|$, для разных форм конструкций и материалов корпуса. Максимальное значение $|S_{11}|$ в полосе частот до 2 ГГц для цилиндрической формы корпуса не превышает минус 20 дБ, тогда как для идентичных размеров пирамидальной формы

корпуса это значение на 5 дБ выше. Предметный стол 71 выполнен из прозрачного материала, в виде полого цилиндра с П-образным продольным сечением и расположен таким образом, что внутренняя полость предметного стола находится со стороны объектива 74 оптической системы. Лифтовая поворотная система позволяет поднять или опустить предметный стол 71 при помощи кольца вертикального скольжения 75, четырех червячных шестеренок 76 с червячной передачей 77, расположенной в полости кольца вертикального скольжения 75. Червячная передача 77 имеет полую вертикальную управляющую ось с зубчатым наконечником 78, проходящую через отверстие в основании 72, и позволяет круговым вращением поднять или опустить предметный стол 71. Поворот предметного стола 71 на заданный угол осуществляется при помощи поворотного кольца 79 по направляющему пазу с внутренней стороны кольца вертикального скольжения 75, четырех шестеренок 80, червячной передачи 77 и вертикальной управляющей оси с зубчатым наконечником 81, расположенной во внутренней полости вертикальной управляющей оси 78.

Экранированные от ЭМП температурные датчики (ТД) 82 (рисунок 3.32) и датчики напряженности электрического поля 83 располагаются внутри корпуса 73. Электрическое соединение с датчиками осуществляется проводниками, через отверстие 84 в основании 72. Цифровые сигналы с ТД подводятся к МП 15, через схему преобразования 85. Датчики напряженности электрического поля 83 имеют выход на внешний вход КИП 56 через соединители 55, расположенные на корпусе модуля электрического ввода 60 на съемной двери 8, а также выход на расположенную в полости съемной двери 8 возле основания 72 внутреннюю схему, содержащую логарифмический усилитель 86 и микроконтроллер с АЦП 87. Через отверстие 84 в основании 72 с защитным кожухом 88 внутрь корпуса 73 вводится трубка 89 для подачи питательных веществ БО от медицинского резервуара 90 и световод бокового свечения в защитном кожухе 91. В корпусе 73 также имеется плавное скругление, переходящее к крепежу трубки 92 и световода бокового свечения без защитного кожуха 93, предназначенное для перехода из большего в меньший диаметр цилиндрического корпуса 73.

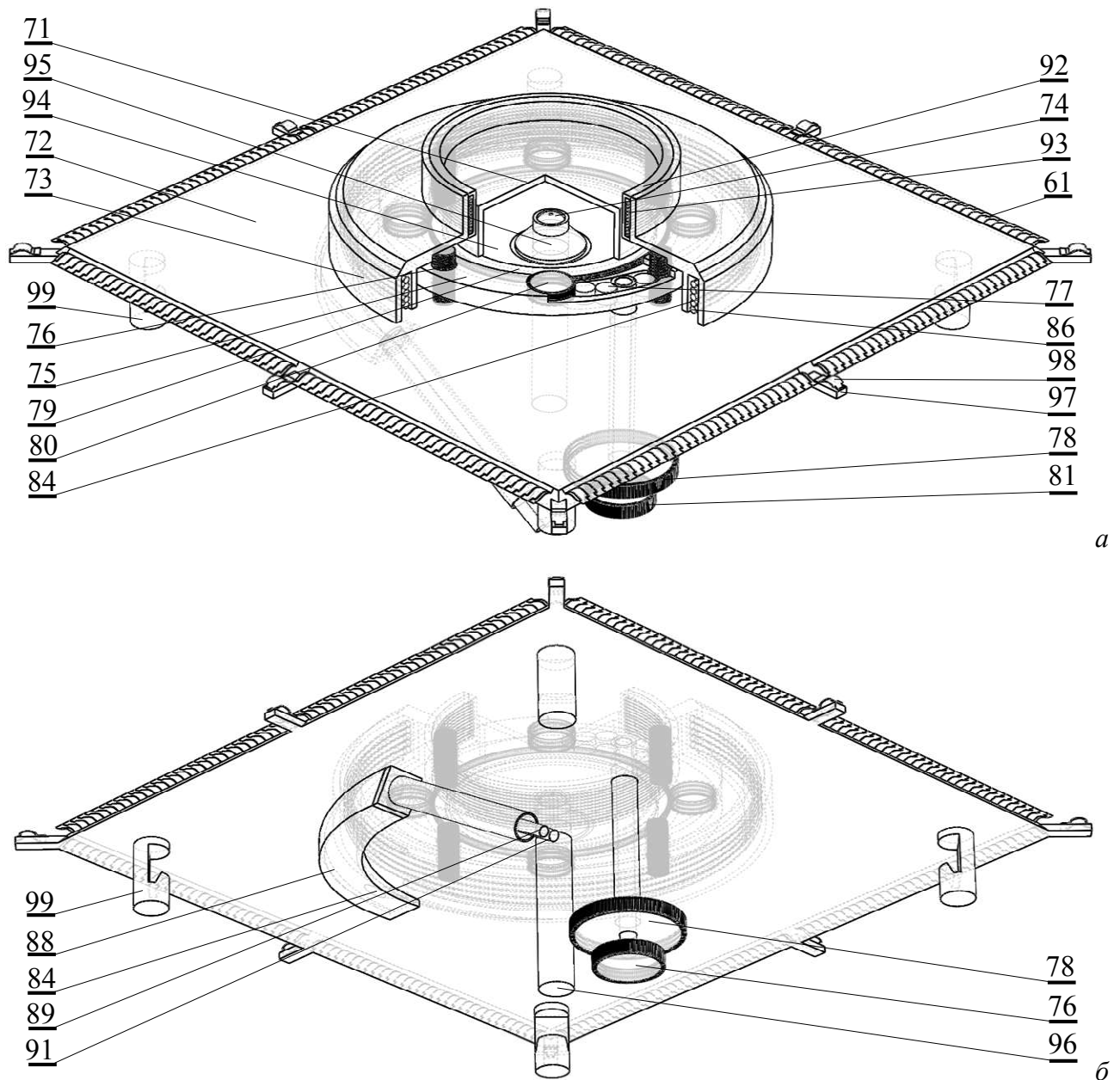


Рисунок 3.31 – Изометрические виды сверху (а) и снизу (б) стола для исследования БО

Световод бокового свечения 93 совместно с конусным отражателем 94 предназначен для равномерного подсвечивания предметного стола 71. В центре металлического основания 72 имеется отверстие, через которое подводится и закрепляется конусным кольцом 95 оптоволоконный кабель 96 оптической системы с одной стороны которого располагается объектив 74, который направлен вертикально на предметный стол 71. На боковой поверхности металлического основания 72 располагаются металлические экранирующие прокладки 61, а также металлические накладки 97 с пружинами электрического контакта 98, необходимые для повышения ЭЭ корпусом при помощи перекрытия щели и плотного прижатия металлического основания 72 при помощи фиксаторов 99 на замки, расположенные во внутренней полости съемной двери 8. Также в полости располагаются модули внешней подсистемы климат

контроля, которые управляются посредством микроконтроллера, расположенного во внутренней полости двери. По периметру съемной двери и испытательного стола припаяны экранирующие 61, 98 и герметизирующие 62 прокладки, необходимые для повышения ЭЭ корпусом при помощи перекрытия щели и плотного прижатия металлического основания 72 при помощи фиксаторов 99 и замков, входящих в конструкцию двери 8 КЭК, а также ТЕМ-(рисунок 3.34а) или GTEM-(рисунок 3.34б) камер.

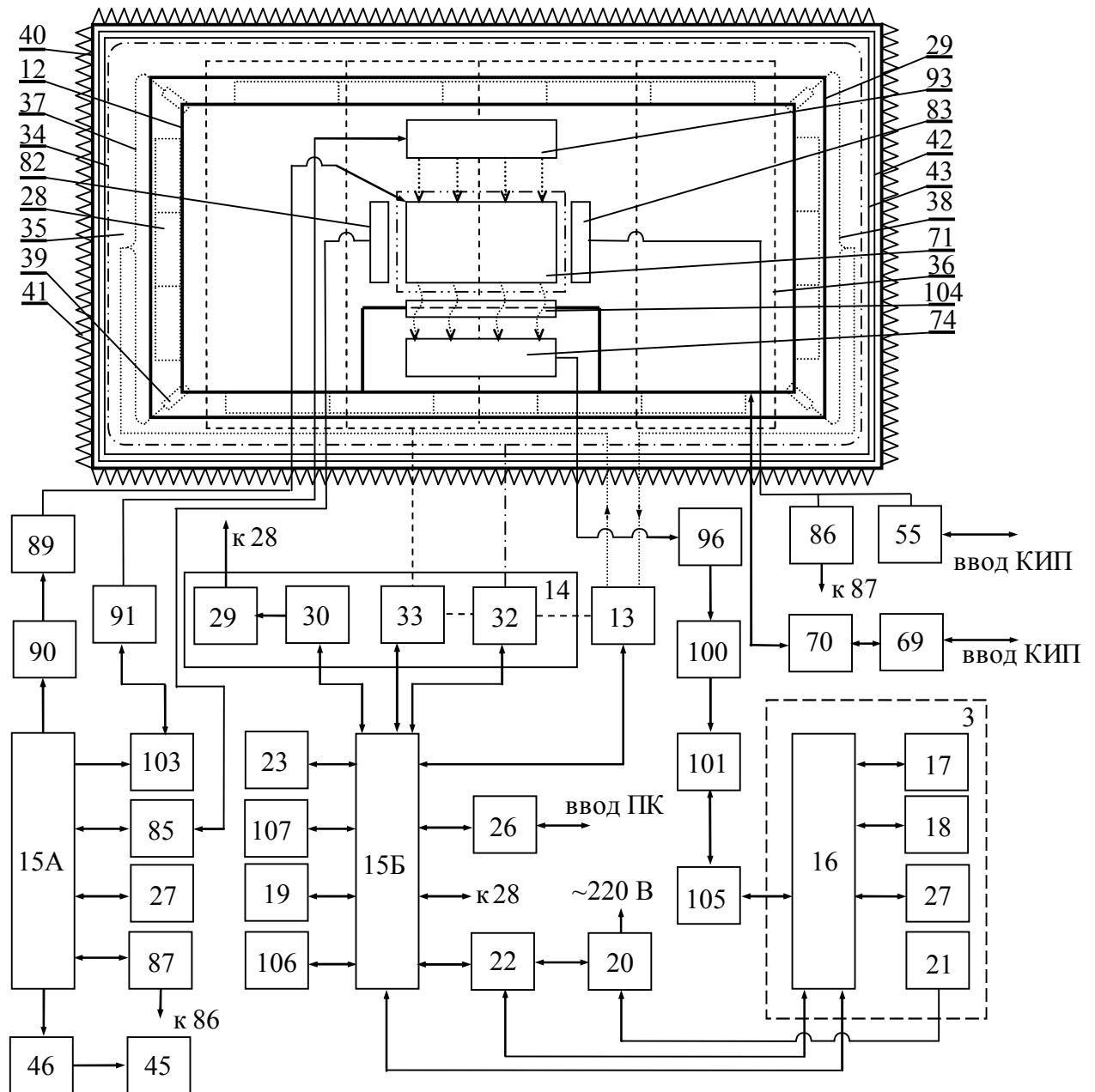


Рисунок 3.32 – Структурная схема управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера

Элементы оптической системы: объектив 74, оптоволоконный кабель 96 и окуляр 100, идентичные эндоскопу, но отличающиеся подстройкой фокусного расстояния l' между

окуляр 100 и видеоматрицей видеокамеры 101. (Подстройка фокусного расстояния на БО 102 позволяет настроить четкость изображения, при неподвижном предметном столе 71, на расстоянии L от ТЕМ-камеры.) Нижняя точка спуска лифтовой поворотной системы определяется оптическими характеристиками оптической системы, а именно, фокусным расстоянием и расстоянием до предметного стола l . Размер апертуры объектива D должен иметь относительно малое значение, для минимизации диаметра отверстия в основании 72. (Большой диаметр может повлиять на равномерность поля и ЭЭ КЭК.)

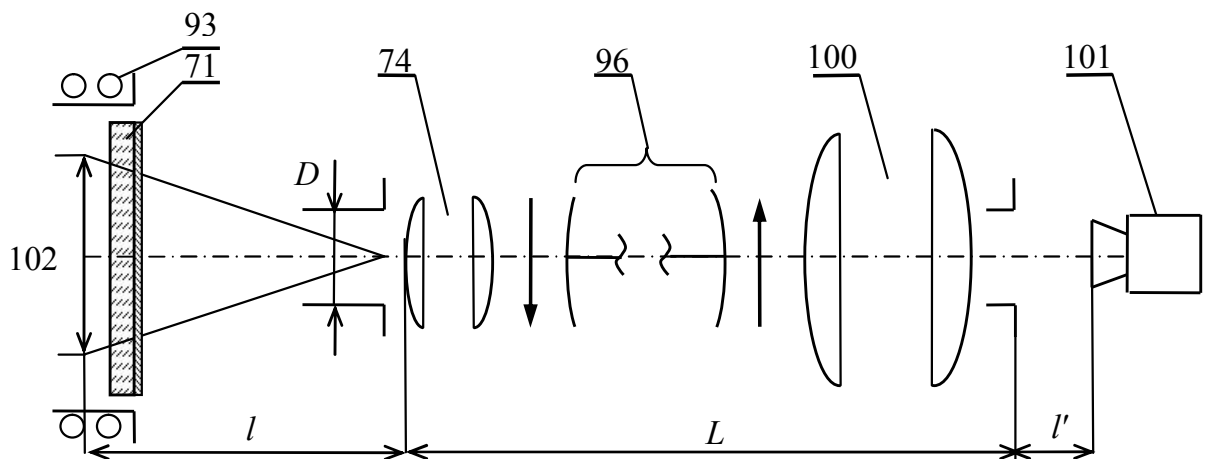


Рисунок 3.33 – Структурная схема
оптической системы стола для биомедицинских исследований

Объектив оптической системы эндоскопического типа расположен вертикально в отверстии металлического основания. Над отверстием размещен БО на поверхности прозрачного предметного стола с равномерной подсветкой его стенок световодом видимого свечения, расположенным в корпусе из неметаллического материала. Таким образом, можно получить видеоизображение БО внутри КЭК, ТЕМ- или GTEM- камер, не извлекая БО из под воздействия, тем самым осуществляя видеонаблюдение результатов эмиссий и непрерывного воздействия ЭМП на БО, в режиме реального времени, с минимальными искажениями ЭМП.

Принцип работы КЭК для биомедицинских исследований заключается в следующем. БО 102, например живая ткань, помещается на предметный стол 71. После крепления фиксаторов 99 защелками к двери 8, БО 102 оказывается внутри испытательного контейнера 12. При необходимости, к живым исследуемым объектам через полую трубку 89 могут подводиться питательные вещества из медицинского резервуара 90. Световодом бокового свечения 93, от внешнего источника света 103 через кабель 91, который вводится в корпус устройства видеонаблюдения, через угловое отверстие 84 (обеспечивающее минимальный изгиб) в

основании 72, подсвечивается БО 102, расположенный на предметном столе 71. Световой поток, подсвечивая БО 102, проходит через экранирующее стекло 104, попадая на объектив 74 короткофокусной оптической системы, содержащей группу линз. Сфокусированное изображение, через волноводный ретранслятор 96 и окуляр 100, попадает на видеоматрицу 101, после чего сигнал обрабатывается сигнальным процессором 105 и подводится на графический МП 16, который выводит изображение на ЖКД 17. При необходимости предметный стол может быть поднят или опущен посредством сигналов от МП 15 с помощью схемы 106. Сигнал также может быть записан на твердотельный накопитель 107 или выведен на ПК 25 при помощи МП 15. Возбуждение ЭМП внутри испытательного контейнера, выполненного в виде ТЕМ-камеры, происходит при помощи генератора 68, подключенного к коаксиальному соединителю 69 камеры, через высокочастотный кабель 70. Равномерность ЭМП обеспечивается при помощи определенных геометрических размеров поперечных сечений корпуса и центрального проводника ТЕМ-камеры.

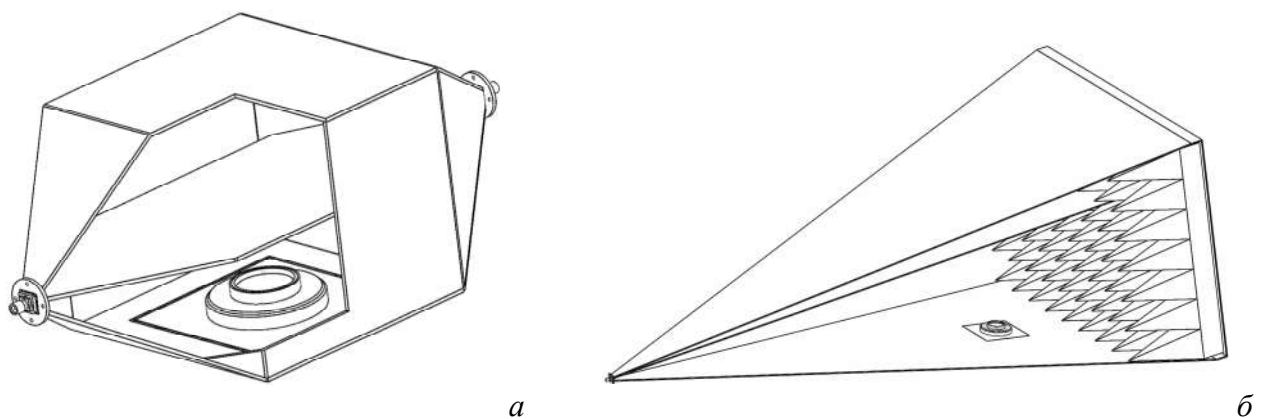


Рисунок 3.34 – Примеры расположения стола для биомедицинских исследований внутри ТЕМ-камеры (а) и ГТЕМ-камеры (б)

Таким образом, при помощи вышеописанной КЭЖ со столом для биомедицинских исследований возможно видеонаблюдение в режиме реального времени и/или видеозаписи на цифровой носитель результатов эмиссий и воздействия с минимальными искажениями ЭМП на БО, находящийся в заданных условиях окружающей среды, не извлекая БО и обеспечивая возможность непрерывного воздействия ЭМП на объект исследования. Биомедицинский стол может быть также использован как отдельное устройство в ТЕМ- или ГТЕМ-камере.

3.2.3 Элементы климатической экранированной камеры

Основной частью КЭЖ является испытательный контейнер, выполненный в виде ТЕМ-камеры, где производятся климатические и электромагнитные воздействия на ИО. Соответственно ТЕМ-камера должна удовлетворять возможности возбуждения поперечных

ЭМВ в широком диапазоне частот с минимальным рассогласованием КИП, а также иметь небольшие габариты, для возможности поддержания заданного температурного поля и влажности воздуха в её внутреннем объеме. Выбрана конструкция ТЕМ-камеры с оптимальными геометрическими параметрами и высотой ИО 20 мм при КСВН<1,22 в полосе частот до 2 ГГц. Возбуждение ЭМП в ТЕМ-камере происходит при подаче на её вход воздействия от внешнего генератора. Контроль и удержание заданной температуры внутри ТЕМ-камеры осуществляется двумя подсистемами. Термовоздушная подсистема обеспечивает приток и циркуляцию через ТЕМ-камеру воздуха с заданной температурой и влажностью. Термоконтактная подсистема обеспечивает заданную температуру стенок ТЕМ-камеры. Работа двух подсистем синхронизирована головным МП для создания климатических условий близких к реальным условиям эксплуатации РЭС.

Выполнен приближенный расчет и моделирование термоконтактной подсистемы КЭК. Исходными данными для расчета являлись максимальный объём ($3,5 \text{ дм}^3$) и расход охлаждающего газа равный изменению максимального объема за час. В качестве охлаждающего газа выбран сухой воздух и воздух, насыщенный паром, при температуре $+150^\circ\text{C}$. Максимальная холодопроизводительность системы при охлаждении от $+150^\circ\text{C}$ до минус 50°C составила около 1 кВт. Моделирование выполнено в программе ANSYS после импортирования модели ТЕМ-камеры [219] из программы CST MWS и дополнения моделями ЭП (TEC1-12712S), расположенными по всей поверхности ТЕМ-камеры. Вычисления (рисунок 3.35) выполнены в пределах температурных диапазонов от $+26^\circ\text{C}$ до минус 50°C и от минус 50°C до $+150^\circ\text{C}$, что имитировало полный режим работы КЭК. Результатом вычисления являлись приближенные значения максимальной мощности ЭП ($0,01 \text{ Вт/мм}^2$), при полном режиме работы камеры с максимально возможным количеством ЭП (60 шт., с габаритами ЭП $40 \times 40 \text{ мм}^2$). Точность поддержания температуры в объеме ИО составила $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а время, за которое возможно достичь заданного диапазона температур – 2800 с.

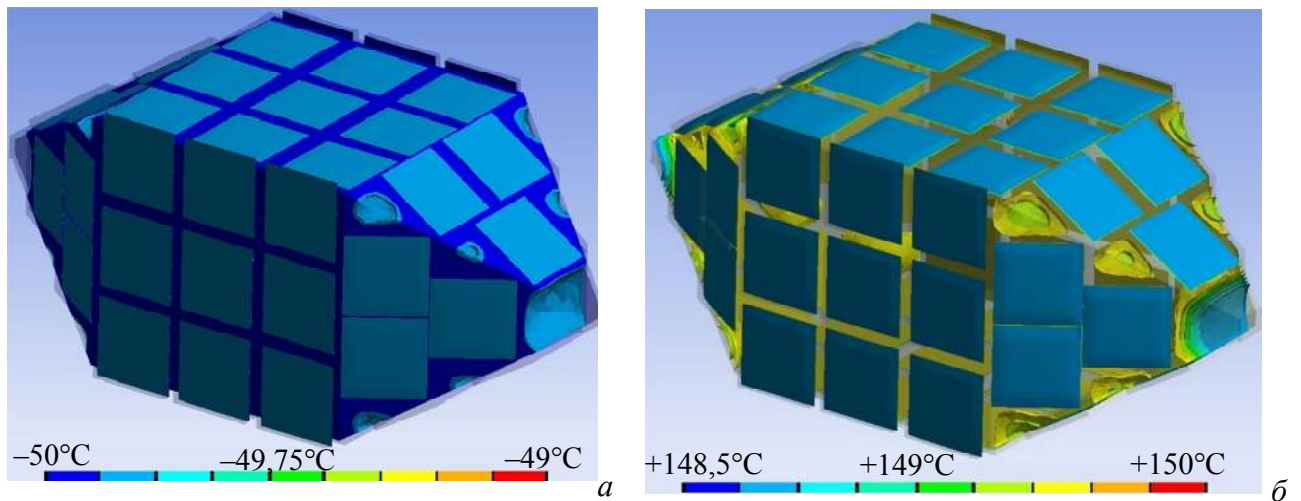


Рисунок 3.35 – Поле температур во внутреннем объеме ТЕМ-камеры, при её охлаждении до минус 50°C, через промежуток времени $t=700$ с (*а*) и последующем нагреве до +150°C при $t=2800$ с (*б*)

Также, выполнено моделирование (рисунок 3.36*а*) на термическое расширение и сжатие металла в результате нагрева и охлаждения конструкции ТЕМ-камеры. Из рисунка 3.36*а* видно, что максимальное расширение (0,4 мм) и сжатие (0,2 мм) металла критичны на самых важных участках конструкции, возле соединителей, что требует более тщательного моделирования и оптимизации геометрических параметров ТЕМ-камеры с учетом теплового расширения, тогда как неучет этого может значительно повлиять на технические характеристики камеры, а именно на $|S_{11}|$.

На основе полученных моделей и созданного лабораторного макета разработана электродинамическая модель ТЕМ-камеры, отличающаяся от исходной наличием входных и выходных отверстий для циркуляции воздушного потока через внутренний объем (рисунок 3.36*б*) ТЕМ-камеры. Отверстия необходимы для внутренней (термовоздушной) системы, обеспечивающей циркуляцию воздушного потока заданной температуры через внутренний объем ТЕМ-камеры. Отверстия расположены в углах корпуса (рисунок 3.36*в*), что позволяет минимизировать неравномерность ЭМП внутри ТЕМ-камеры.

Выполнены вычисления для диаметров отверстий от 1 до 3 мм и предварительная параметрическая оптимизация, в результате которой получена оптимальная частотная зависимость $|S_{11}|$ (рисунок 3.37).

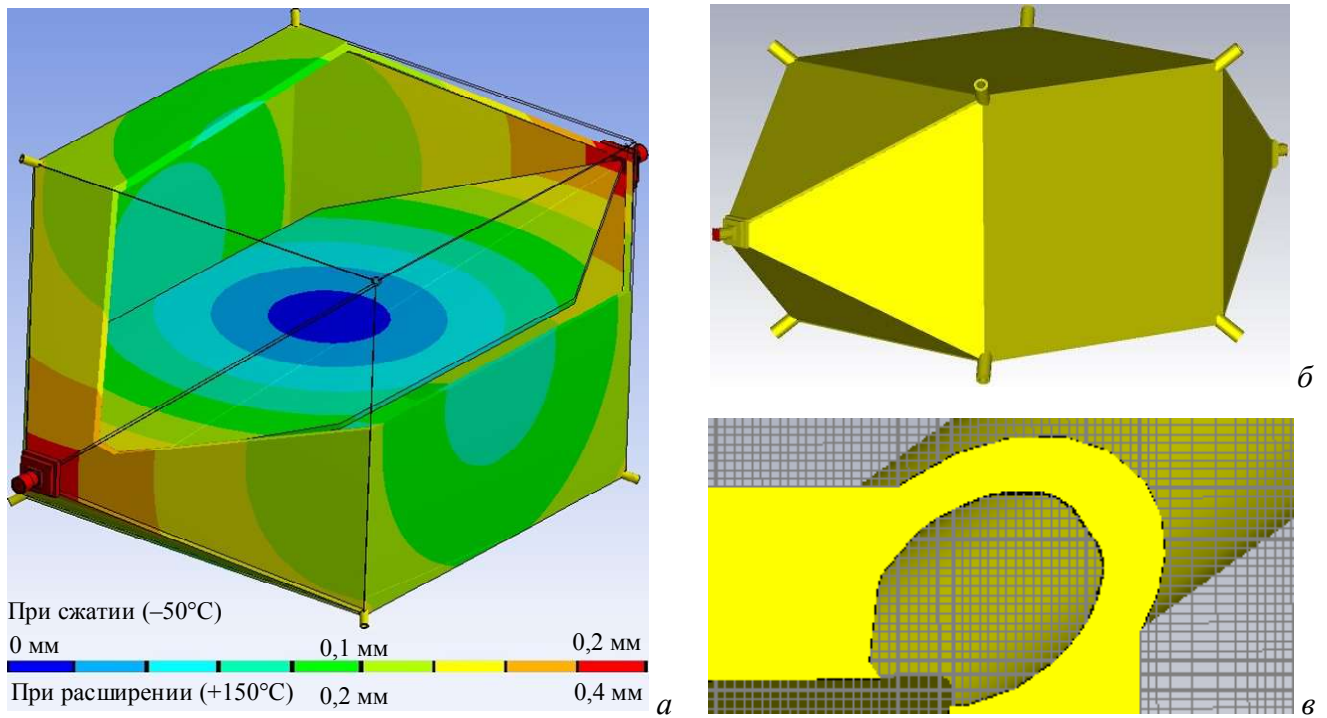


Рисунок 3.36 – Максимальное расширение и сжатие металла при нагреве и охлаждении на пределах температурного диапазона минус 50°C и $+150^{\circ}\text{C}$ (*a*) для модернизированной модели ТЕМ-камеры (*б*) с цилиндрическими воздушными каналами (*в*)

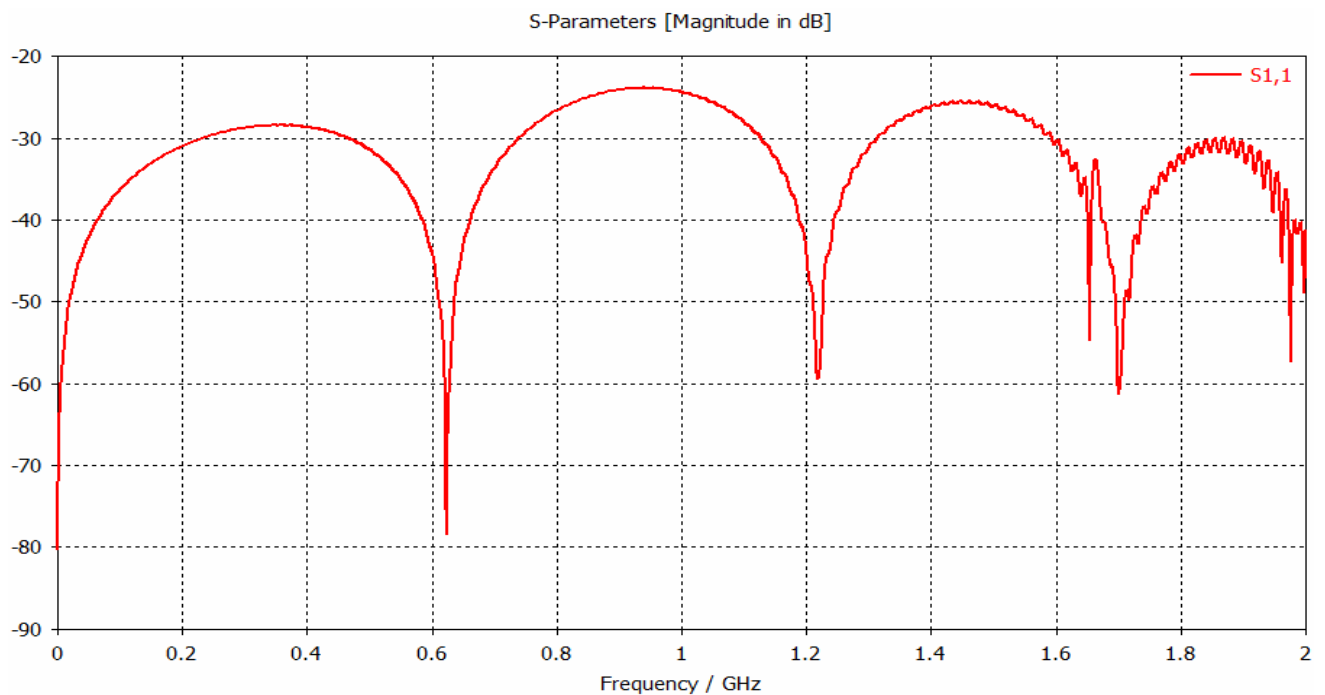


Рисунок 3.37 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ для ТЕМ-камеры с диаметром отверстия 3 мм в углах корпуса

Частотная зависимость $|S_{11}|$ для ТЕМ-камеры с отверстиями диаметром 3 мм в углах корпуса, совпадает с частотной зависимостью $|S_{11}|$ без отверстий (рисунок 3.37), что говорит о

наименьшем влиянии отверстий с диаметром 1–3 мм, на равномерность распространения ЭМП внутри ТЕМ-камеры.

По результатам моделирования разработана термодатчик контактная система. Поскольку одновременная работа большого количества ЭП, с током потребления каждого более 10 А, создаст высокую нагрузку на источник питания, то для её снижения, а также с целью минимизации пульсаций регулируемого напряжения, необходимо использовать многофазные ШИМ регуляторы. Разработаны платы управления терморегулятора и Н-моста. Структурная схема (рисунок 3.38) содержит 60 ЭП, расположенных на поверхности ТЕМ-камеры. Управление элементами осуществляется через Н-мосты с ШИМ сигналами, формируемыми платой управления. Плата управления содержит ведущий и три ведомых МК (ATMega2560), каждый из которых имеет по 15 выводов аппаратной ШИМ сигнала. Также, на плате управления имеется инвертирующий буфер HEF4049 для инвертирования токов через каждый ЭП в зависимости от режима работы КЭК: нагрев, охлаждение. Информация о текущем состоянии терморегулятора отображается на ЖКД. Контроль температуры на поверхности ТЕМ-камеры и на плате управления осуществляется 64 цифровыми ТД MAX31725.

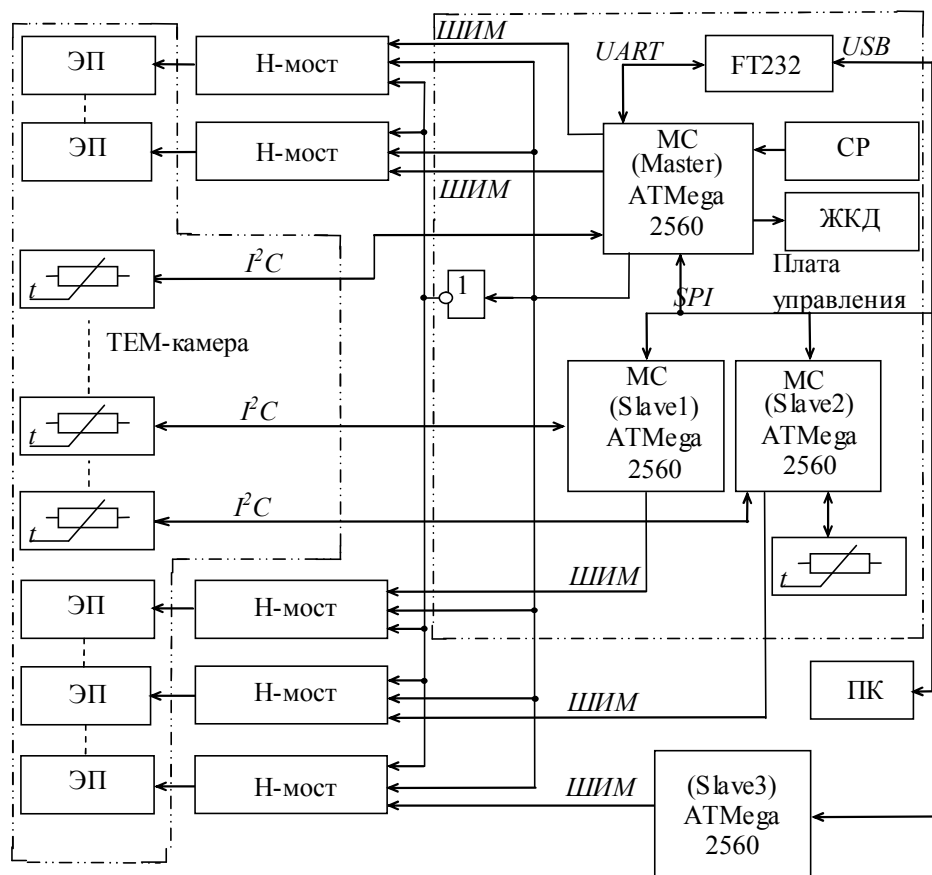


Рисунок 3.38 – Структурная схема платы управления терморегулятора

ПИД регулятором, исходные данные для которого поступают от нескольких цифровых ТД, расположенных на поверхности ТЕМ-камеры, между ЭП.

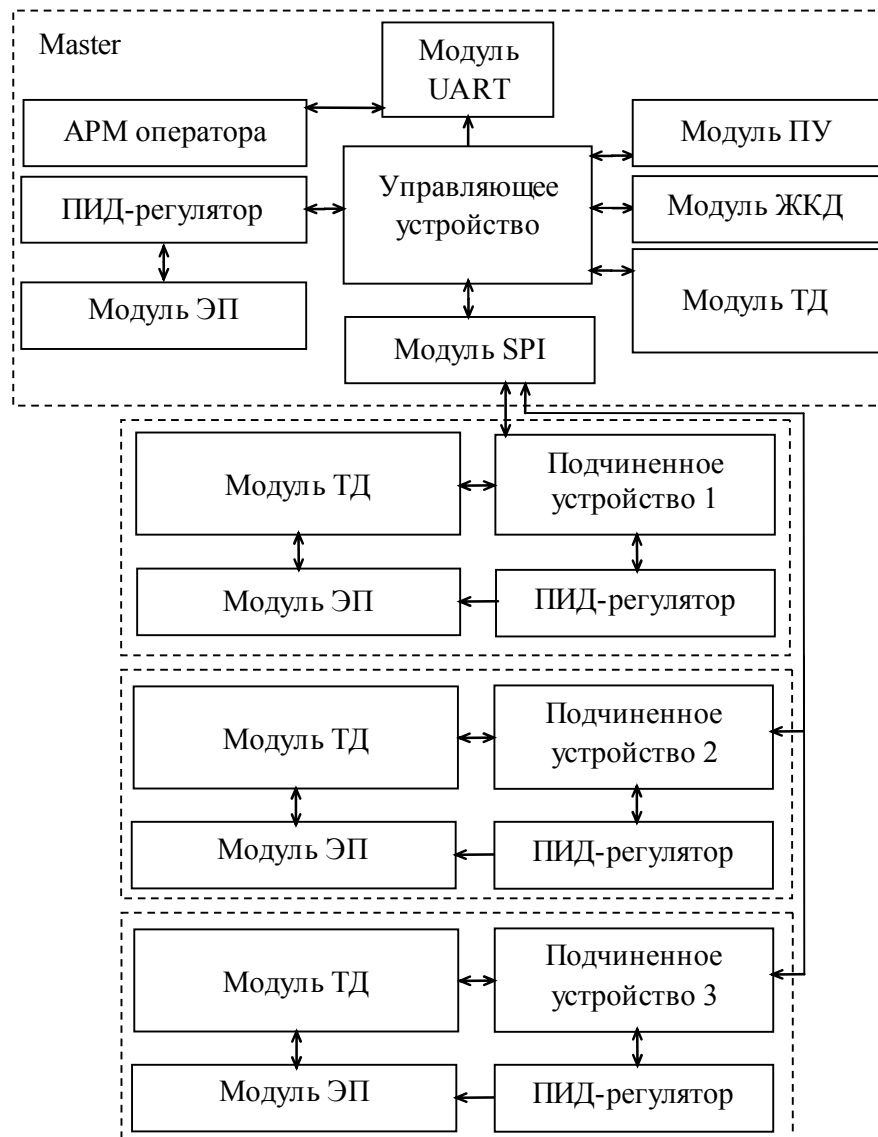


Рисунок 3.40 – Модульная структура ПО платы управления терморегулятором

Программно реализован пятифазный ШИМ сигнал, с параметрами управляющего ШИМ сигнала, зависящими от выбранного режима работы таймера. В МК предусмотрены следующие режимы работы ШИМ: быстрая ШИМ и ШИМ с точной фазой (рисунок 3.41а). От выбора режима работы зависит форма управляющего ШИМ сигнала. Для импульсных источников питания наиболее применим ШИМ сигнал с точной фазой, поскольку во время изменения скважности ШИМ сигнала не происходит сдвига фазы (рисунок 3.41б), что контролировать невозможно, используя быструю ШИМ. Однако, максимальная частота ШИМ сигнала снижается вдвое, за счет особенности работы счетчика с ШИМ сигналом с точной фазой. В

режиме быстрой ШИМ счетчик сбрасывается при совпадении с регистром сравнения таймера. В режиме точной фазы ШИМ счетчик считает до совпадения с регистром сравнения таймера и затем производит обратный отсчет до нуля.

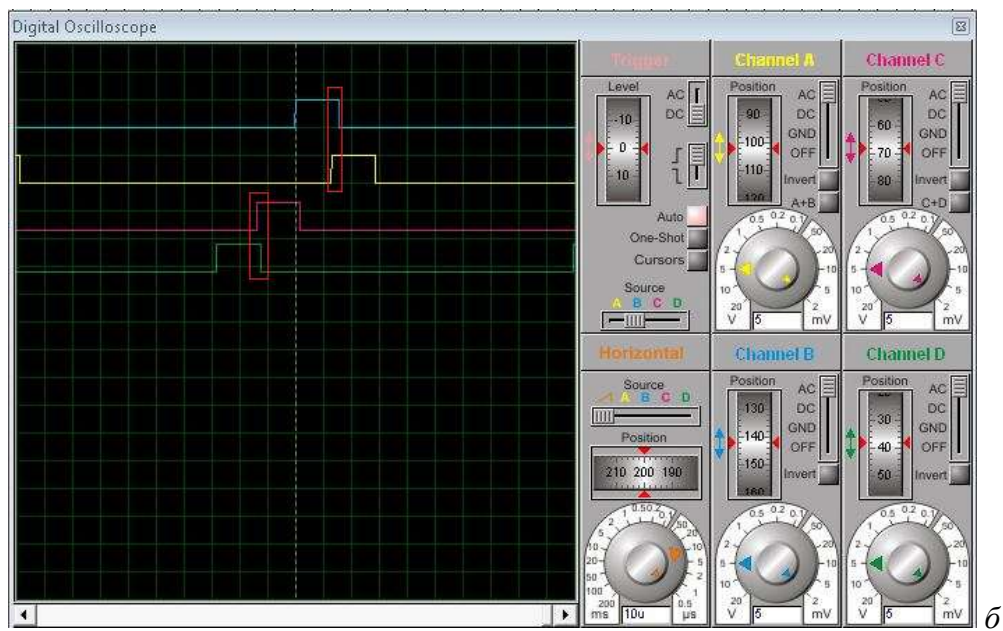
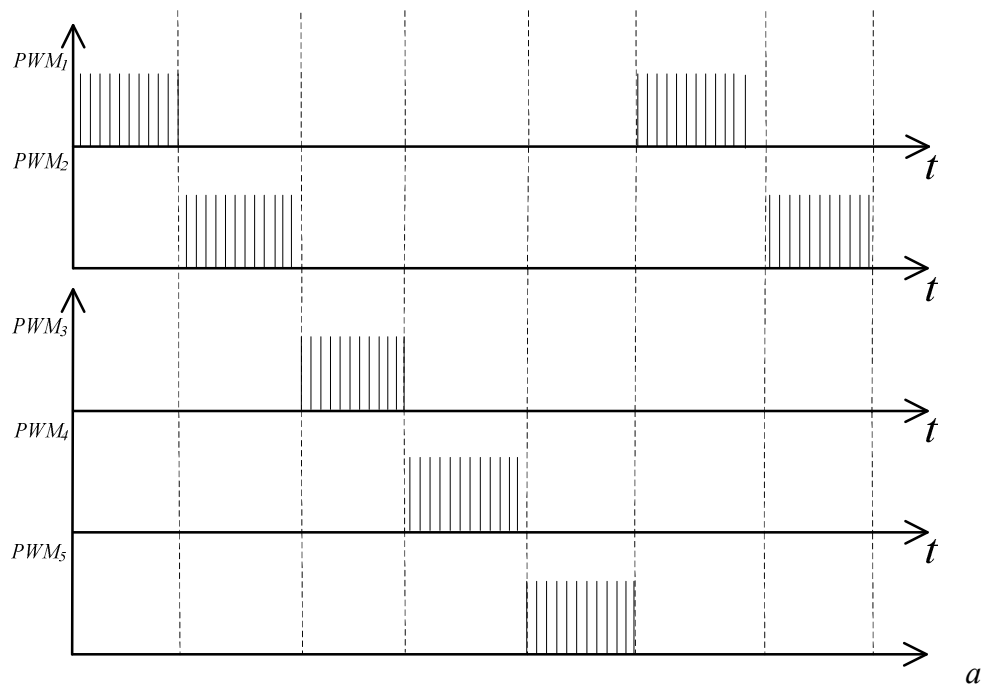


Рисунок 3.41 – Диаграмма пятифазного ШИМ сигнала (а), сдвиг фазы ШИМ (б)

В МК имеется 5 аппаратных таймеров, 3 из которых 16-разрядные, что позволяет в режиме ШИМ точной фазы задать верхний предел счетчика равным 1023. Частота ШИМ сигнала в режиме коррекции фазы ШИМ рассчитывается по формуле [259]:

$$f_{OCnPCPWM} = \frac{f_{CLK} - I/O}{N \times 510}, \quad (3.1)$$

где $f_{CLK_I/O}$ – рабочая частота МК, N – коэффициент делителя частоты ШИМ сигнала (1, 8, 64, 256, 1024). В КЭК все МК работают на частоте 16 МГц, коэффициент делителя равен 1, таким образом, ШИМ сигнал работает на частоте 31,372 кГц.

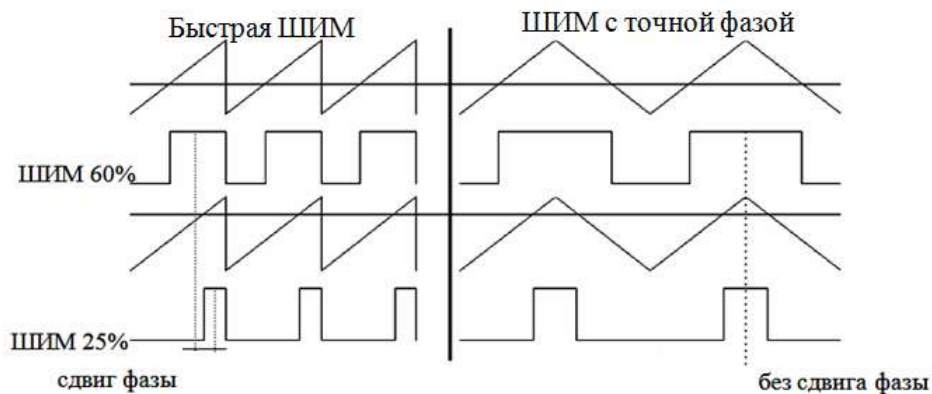


Рисунок 3.42 – Режим работы ШИМ

Для равномерного нагрева или охлаждения поверхности ТЕМ-камеры необходимо контролировать значения температуры с ТД 1 на различных поверхностях камеры. Это достигается за счет распределения ЭП 2 по поверхности камеры и выделения их в группы 3. Поскольку каждый МК контролирует температуру с одной стороны ТЕМ-камеры, работа ШИМ у них будет одинакова, т.к. в один период времени сигнал ШИМ будет подаваться на определенные группы ЭП. Таким образом, достигается управление пятифазным импульсным питанием ЭП, расположенными на поверхности ТЕМ-камеры.

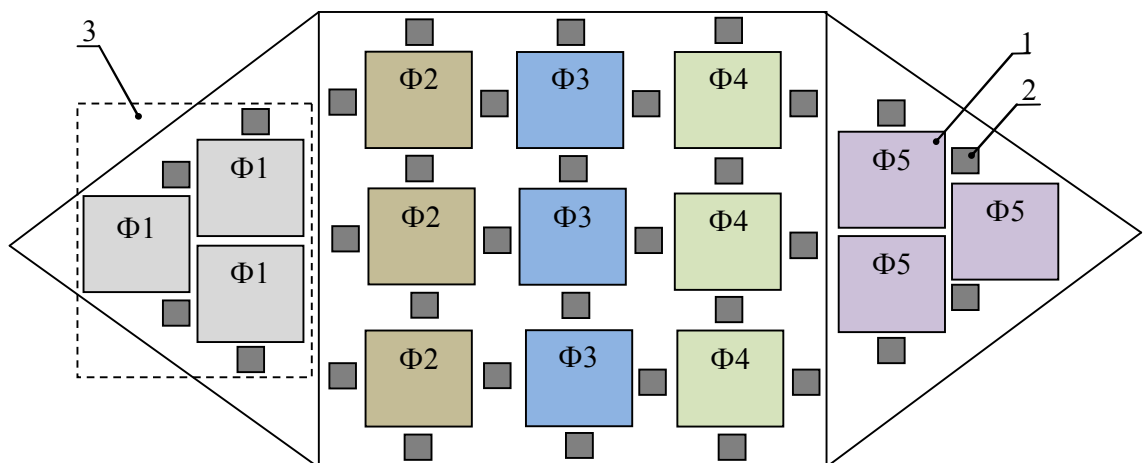


Рисунок 3.43 – Расположение элементов Пельтье 1, датчиков температуры 2 на поверхности ТЕМ-камеры; группа ЭП, работающих в одной фазе 3

Для моделирования пятифазного сигнала ШИМ разработана программа на языке Си в среде разработки WinAVR для МК ATmega2560 [259]. Аппаратные таймеры (1–5) сконфигурированы в режиме точной фазы ШИМ с верхним счетчиком 1023 такта. В качестве

источника тактирования выбран системный источник тактирования на 16 МГц. После распределения максимального количества тактов таймера 1023 между пятью таймерами (с периодом каждого 127,88 мкс), время работы каждого таймера ограничилось до 204 тактов, что является максимальным периодом для каждого таймера.

Собран лабораторный макет терморегулятора (рисунок 3.44). Его работа показала возможность достижения температур от +2°C до +125°C. Данный диапазон температур получен при комнатной температуре без радиаторного блока на ЭП, поэтому диапазон отрицательных температур не достигался.

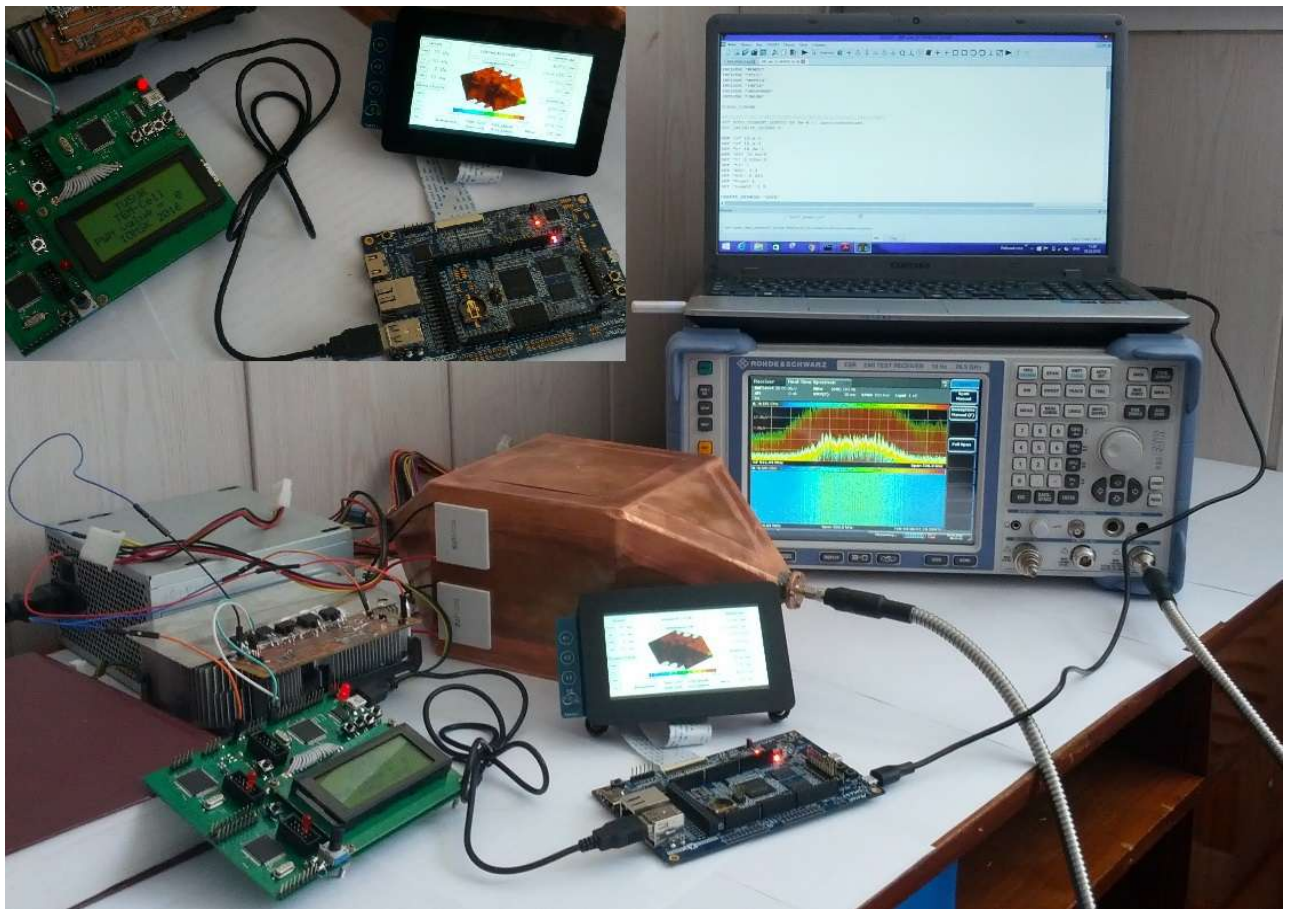


Рисунок 3.44 – Лабораторный макет терморегулятора

Разработаны принципиальные схемы и ПП для платы управления и Н-моста внешней (термоконтантной) системы нагрева/охлаждения стенок ТЕМ-камеры для КЭК.

Разработана структурная схема датчика напряженности электрического поля (рисунок 3.45). Чувствительным элементом является антенна, сигнал с которой поступает на входную цепь, согласующую антенну со входом детектора, в полосе частот до 500 МГц. Сигнал с детектора поступает на вход АЦП. После оцифровки с требуемой точностью сигнал может быть записан в память МК или выведен по шине I²C или SPI для дальнейшей цифровой обработки и/или хранения. В качестве источника питания выбран гальванический элемент

напряжением 1,5 В, требуемое напряжения 5 В формируется при помощи DC/DC-преобразователя и линейного стабилизатора.

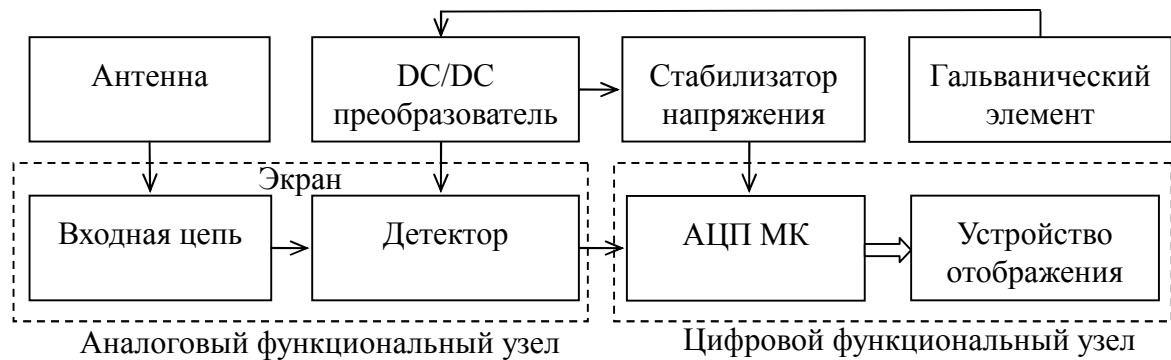


Рисунок 3.45 – Структурная схема датчика напряженности электрического поля

Разработана электрическая принципиальная схема датчика напряженности электрического поля (рисунок 3.46). В качестве детектора выбран логарифмический усилитель-детектор (ЛУ) в интегральном исполнении AD8307, который при измерении амплитуды напряженности электрического поля обеспечивает динамический диапазон (ДД) до 92 дБ, в диапазоне частот до 500 МГц. Сигнал от антенны поступает на детектор, через частотно-зависимый делитель $R1$, $R2$, $R4$, $C1$, $C3$, предназначенный для согласования входного сопротивления ЛУ (1,1 кОм) с 50-омным трактом. Граничная частота входного фильтра выбрана достаточно высокой – 3,455 МГц, чтобы свести к минимуму влияние нежелательных низкочастотных сигналов. ЛУ содержит операционные усилители, детектор и ФНЧ. С выхода ЛУ протектированный сигнал поступает на цифровой узел, главным элементом которого является МК ATSAM20G16A-AU с 12-разрядным АЦП [259], который оцифровывает и записывает его в постоянную память емкостью 64 К. В качестве источника используется гальванический элемент питания напряжением 1,5 В. Для формирования требуемого напряжения питания аналогового узла датчика 5 В используется DC/DC-преобразователь NCP1450ASN50T1. Поскольку для работы МК требуется стабилизированное напряжение меньше 5 В, в цепи питания предусмотрен стабилизатор напряжения на 3,3 В (AP7333), которым обеспечивается нормальный режим работы МК.

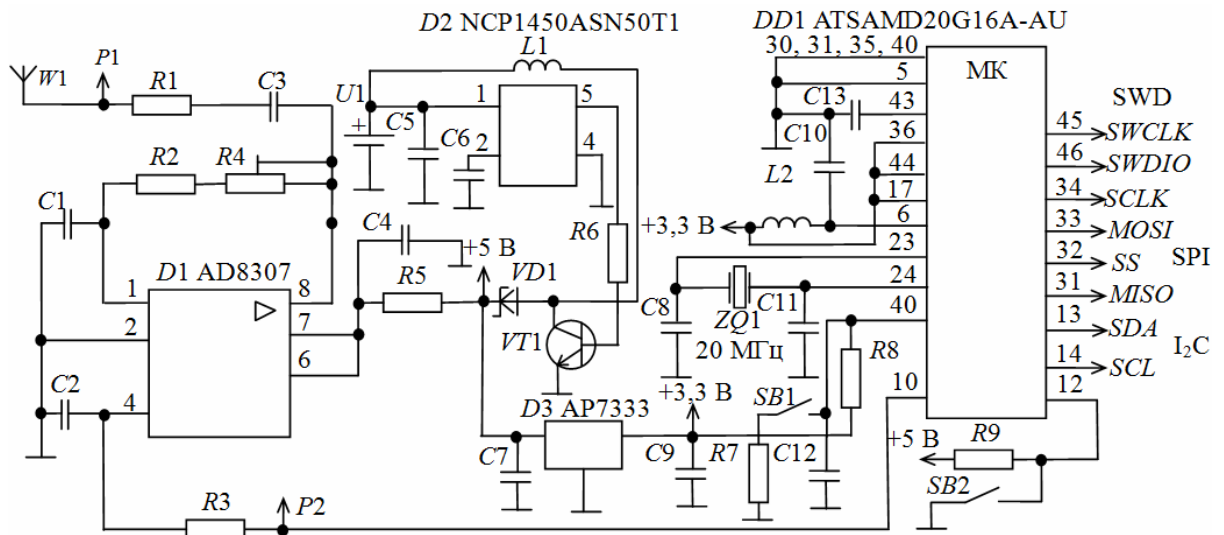


Рисунок 3.46 – Принципиальная схема датчика напряженности электрического поля

Кварцевый резонатор выбран таким образом, чтобы обеспечить достаточно эффективное разрешение и скорость преобразования для АЦП с 12-битной точностью. По техническим данным значение частоты кварцевого резонатора не может превышать 48 МГц и может быть получено с помощью делителя тактовой частоты МК с коэффициентами деления от 1 до 7. Выбран кварцевый резонатор HC49SMD с частотой – 20 МГц, при этом частота дискретизации АЦП составила 156,25 кГц с шагом квантования 805,8 мкВ. Согласно техническим характеристикам, АЦП выбранного МК может выполнять преобразование с разрядностью до 16 бит с применением оверсемплинга и децимации. Таким образом, при необходимости можно получить шаг квантования 50,3 мкВ, что повысит точность измеряемых данных.

Согласно разработанной принципиальной схеме выполнены компоновка, трассировка ПП и создан лабораторный макет (рисунок 3.47а). На верхнем слое размещены компоненты, нижний слой отведен под сплошной полигон земли. Для ПП выбран материал СТФ-2-2-18-0,25, с $\epsilon_r = 4,3$. В программе TALGAT рассчитана ширина (0,48 мм) сигнальных трасс для согласования с 50-омным трактом. На входе и выходе аналогового узла схемы установлены SMA соединители для подключения прибора, позволяющего настроить параметры цепи. Вторым вариантом ПП является конструкция в миниатюрном исполнении (рисунок 3.47б). Она состоит из многослойной ПП с внутрислойными вырезами и экранирующей крышки. Вырезы в слоях необходимы для размещения в них корпусов планарных компонентов, располагаемые на соседних слоях. Таким образом, достигается миниатюризация габаритов датчика.

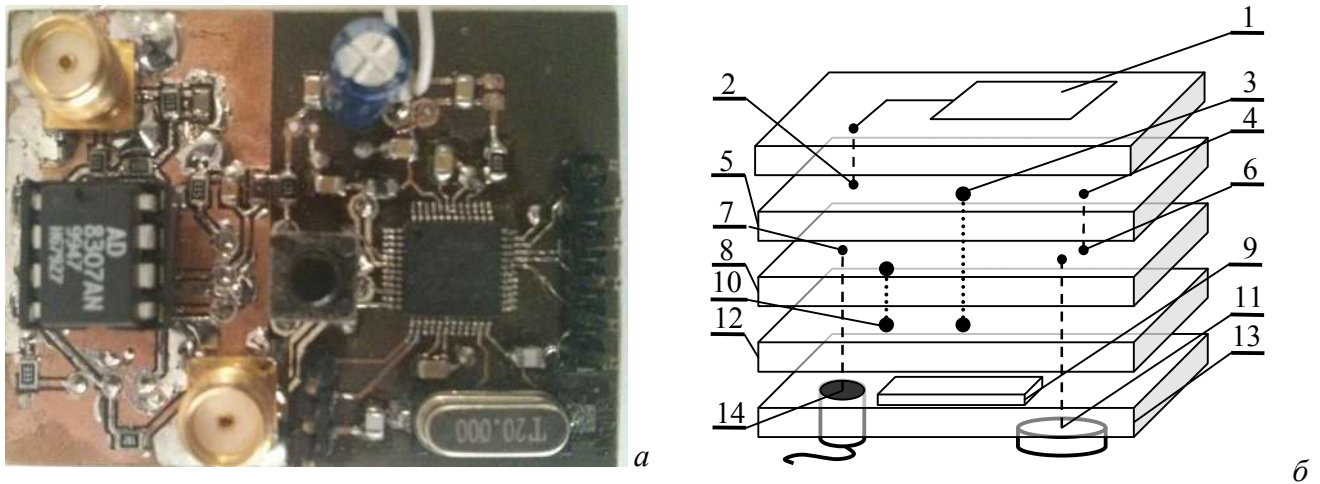


Рисунок 3.47 – Лабораторный макет (а) и миниатюрный вариант исполнения (б) датчика напряженности электрического поля: 1 – чувствительный элемент (первый и второй слои); 2 – вход аналогового узла; 3 – питание +5 В; 4 – выход аналогового узла; 5 – третий и четвертый слои аналогового узла; 6 – вход цифрового узла; 7 – выход цифрового узла; 8 – пятый и шестой слои цифрового узла; 9 – гальванический элемент питания; 10 – напряжение питания +3,3 В; 11 – кнопка; 12 – седьмой и восьмой слои питания; 13 – экранирующий корпус; 14 – соединитель, вывод данных

Первый и второй слои предназначены для размещения на них чувствительного элемента. На третьем слое располагается аналоговый узел, а четвертый слой служит полигоном земли. Через сквозные металлизированные отверстия сигналы с выхода ЛУ поступают на пятый слой, на котором расположен микроконтроллер, шестым слоем является полигон земли. Питание цифрового и аналогового узлов осуществляется от гальваническим элемента (восьмой слой ПП) с напряжением питания 1,5 В, через DC/DC-преобразователь расположенный на седьмом слое ПП. Соединитель, предназначенный для вывода информации на устройство отображения, также как и кнопка, соединен с соответствующими блоками схемы и выведен с внешней стороны через экранирующий корпус. Вторая конструкция при надежной реализации дает существенные преимущества. Во-первых, она является миниатюрной. Во-вторых, она позволяет разделить цифровую и аналоговую земли, уменьшив цифровые помехи, а также наводки, за счет использования земляных полигонов как экранирующих пластин между двумя узлами.

В качестве источника питания предлагается использовать импульсный блок питания (ИБП), имеющий систему аварийного питания и восемь каналов стабилизации выходного напряжения. Из них один канал +24 В служит для заряда аккумулятора. Данный уровень напряжения должен устанавливаться при включении вилки камеры в розетку. Девятый канал управления служит для запуска ИБП и перехода его из ждущего режима. Система аварийного

питания предназначена для резервного питания: головного МП, ПУ и устройств управления петлями, стяжкой, компрессором и двигателями постоянного тока. Она необходима для корректного экстренного завершения работы и бесперебойного сохранения всех задач в ПЗУ, а также изъятия ИО из КЭК и закрытия двери.

Таким образом, выполнено моделирование широкого диапазона температур от минус 50°C до +150°C на поверхности ТЕМ-камеры, а также вычисление термического воздействия, которое на пределах температурного диапазона может повлиять на характеристики ТЕМ-камеры. Представлены структурные схемы и создано устройство для термоконтактной системы КЭК. Разработаны платы управления и Н-моста для терморегулирования, позволяющие управлять большим количеством ЭП на поверхности ТЕМ-камеры. Разработан Н-мост, управляемый одним ШИМ сигналом и позволяющий инвертировать токи протекания через ЭП посредством логического уровня. Разработаны структурная схема, алгоритм работы, ПО и выполнено моделирование работы пятифазного ШИМ регулятора для КЭК, который позволяет стабилизировать температуру в диапазоне от минус 50°C до + 150°C для ТЕМ-камеры и снизить нагрузку на источник питания в 5 раз.

3.2.4 Методы совместных климатических и электромагнитных исследований и испытаний

Камера позволяет проводить исследования и испытания объекта, представляющего собой отдельный компонент или небольшое устройство в целом, на ЭМС с одновременным контролируемым воздействием климатических условий окружающей среды, в частности, испытаний на стойкость объекта к совместным воздействиям контролируемых электромагнитного и температурного полей внутри испытательного контейнера, а также измерения тепловых эмиссий при электромагнитном воздействии или измерения тепловых и электромагнитных эмиссий от объекта испытания, находящегося при заданном значении влажности воздуха внутри испытательного контейнера камеры.

Методы испытания компонентов основаны на стандартах по испытаниям на эмиссии и устойчивость ИС, а также включают общие стандарты для испытаний РЭА на ЭМС в ТЕМ-камерах. При испытаниях измеряются характеристики ИО в диапазоне частот до 2 ГГц при воздействии: полем – до 3 кВ/м, температуры – от минус 50 до +150 °C, влажности – до 90%, при ЭЭ корпусом шасси не менее 40 дБ в диапазоне частот до 40 ГГц.

Испытания на помехоэмиссию включают измерения излучаемых эмиссий от ИО при подаче на его вход полезного сигнала (рисунок 3.48). Также возможны измерения эмиссий при

кратковременном пропадании питания или подаче кондуктивного воздействия по цепи питания ИО. Данные измерения возможно проводить в широком диапазоне температур.

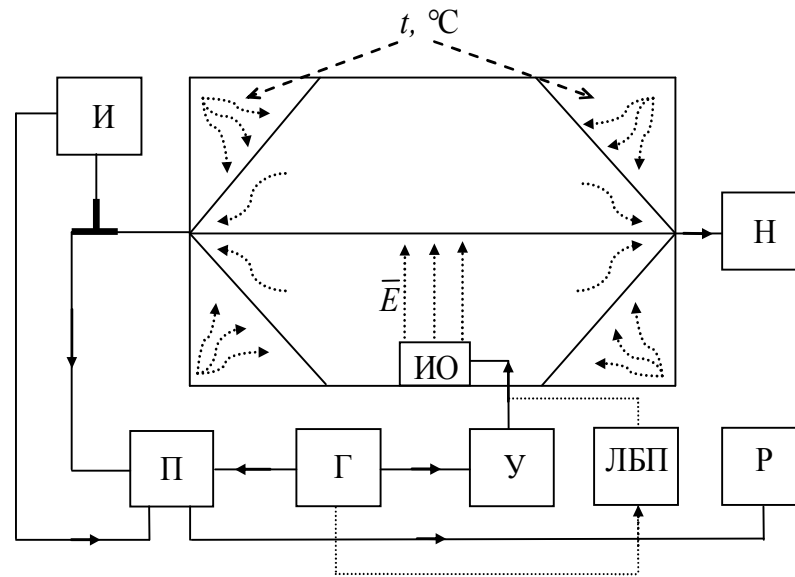


Рисунок 3.48 – Схема измерения помехоэмиссий от ИО

Применяемое оборудование при измерении: У – усилитель (при необходимости); И – измеритель мощности; Г – генератор; П – измерительный приёмник; Р – рабочая станция с ПО; Н – нагрузка 50 Ом; ЛБП – лабораторный блок питания (при необходимости). С генератора через усилитель на вход ИО подаётся сигнал заданной формы и амплитуды. Измерительным приёмником измеряются эмиссии от ИО, наводимые на согласованную линию передачи (ТЕМ-камеру). Для ИО с питанием, настраиваются форма и уровень кондуктивного воздействия на генераторе, после чего помеха подаётся в цепь питания ИО. Длительность кратковременного пропадания питания регулируется ЛБП.

Испытания на помехоустойчивость включают измерения характеристик ИО при воздействии на него ЭМП с заданной напряжённостью, с одновременным воздействием температурного поля в диапазоне температур (рисунок 3.49). При этом относительная влажность воздуха в камере не должна выходить за заданный диапазон 40–60%.

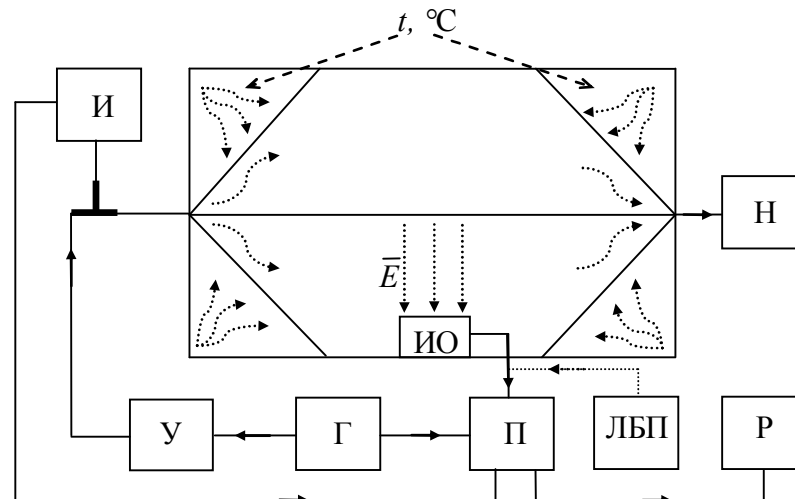


Рисунок 3.49 – Схема испытания на помехоустойчивость ИО

Применяемое оборудование: У – усилитель; И – измеритель мощности; Г – генератор; П – измерительный приёмник; Р – рабочая станция с ПО; Н – нагрузка 50 Ом; ЛБП – лабораторный блок питания (при необходимости). С генератора на вход камеры через усилитель и направленный ответвитель подается испытательный сигнал, возбуждающий T_{10} -волну, проходящую вдоль камеры, воздействуя на ИО. Воздействием может быть и СКИ. Измерение подводимой мощности выполняется с помощью измерителя мощности, подключенного через ответвитель. Измерение поля в камере может выполняться с помощью внутреннего измерителя. Рабочая станция необходима для настройки, отображения и записи измеренных значений.

Температурные испытания компонентов могут проводиться при воздействии на ИО температурным полем в диапазоне от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.50). При этом ИО может быть выше ($60 \times 100 \times 100 \text{ мм}^3$) за счет того, что на ИО не воздействует ЭМП и неравномерность поля не имеет значения. Применяемое оборудование: И – источник сигнала (формирователь произвольных сигналов); П – измерительный приёмник; Р – рабочая станция с ПО; Н – нагрузка 50 Ом; ЛБП – лабораторный блок питания (при необходимости). Сигнал заданной формы подаётся на ИО. Измерительным приёмником измеряются параметры в нормальных условиях (при $t=20^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 40–60%) эксплуатации ИО. После этого производится воздействие температурным полем с постоянной влажностью воздуха и измеряются параметры компонентов. После измерения параметров компонента при воздействии только температуры, проводятся совместные испытания с воздействием температуры и влаги. Все параметры измерения от измерительных приборов и КЭЖ одновременно записываются в память рабочей станции.

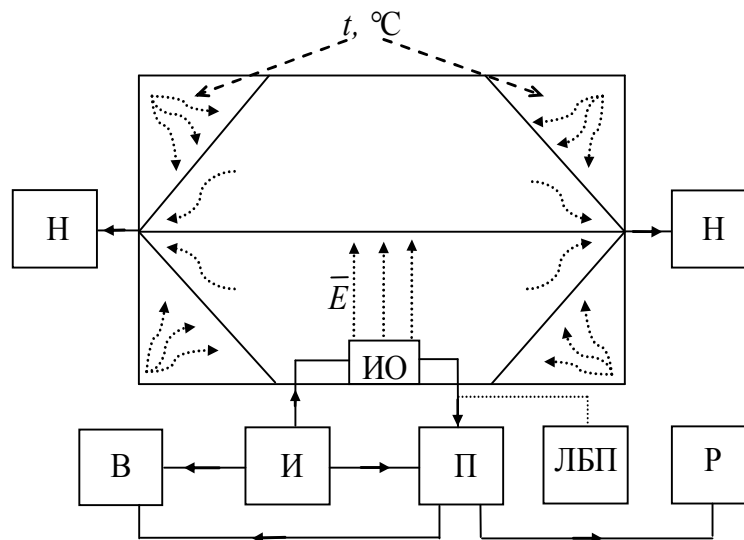


Рисунок 3.50 – Схема измерения характеристик компонентов при воздействии температурного поля и влажности воздуха

Схема подключения внешних измерительных устройств для проведения биомедицинских исследований с помощью КЭК содержит измеритель (И) и усилитель (У) подводимого сигнала с генератора (Г), исследуемый БО, микроскоп или стол с визуальным контролем для биомедицинских исследований (М), измерительный приемник или анализатор спектра (ИП), резервуар с питательными веществами (при необходимости) (РПВ), рабочую станцию (РС), нагрузку 50 Ом (Н) (рисунок 3.51).

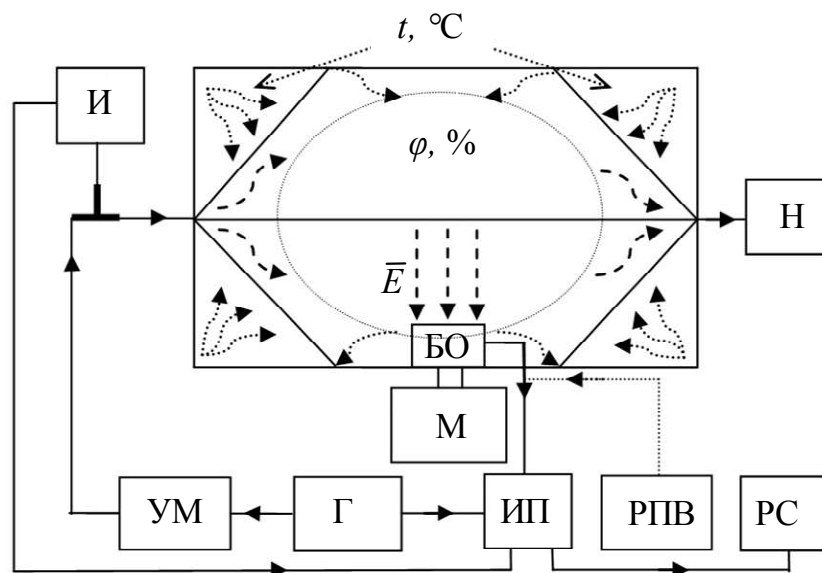


Рисунок 3.51 – Схема для проведения биомедицинских исследований

Для создания ЭМП, вместо генератора и усилителя может быть использован, например, генератор импульсного напряжения ГИН-1-1 (FID Technology) с амплитудой напряжения до

1000 В с длительностью (по половине амплитуды) 300 пс и частотой повторения до 1 кГц. Такое воздействие способно создать в рабочем объеме ($100 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$) камеры поперечную ЭМВ напряженностью 16 кВ/м.

3.3 GTEM-камера

Устройство разработанной GTEM-камеры и общая схема подключения измерительного оборудования показаны на рисунке 3.52. Конструкция GTEM-камеры состоит из внешнего металлического корпуса, выполненного в форме четырехгранной пирамиды, внутри которой размещается центральный проводник. Основание пирамиды изнутри покрыто РПМ. Центральный проводник соединяется с коаксиальным соединителем на вершине пирамиды и с массивом согласованных нагрузок у основания пирамидальной структуры. Центральный проводник смещен относительно центра конструкции GTEM-камеры вверх, что позволяет увеличить объем пространства под ИО.

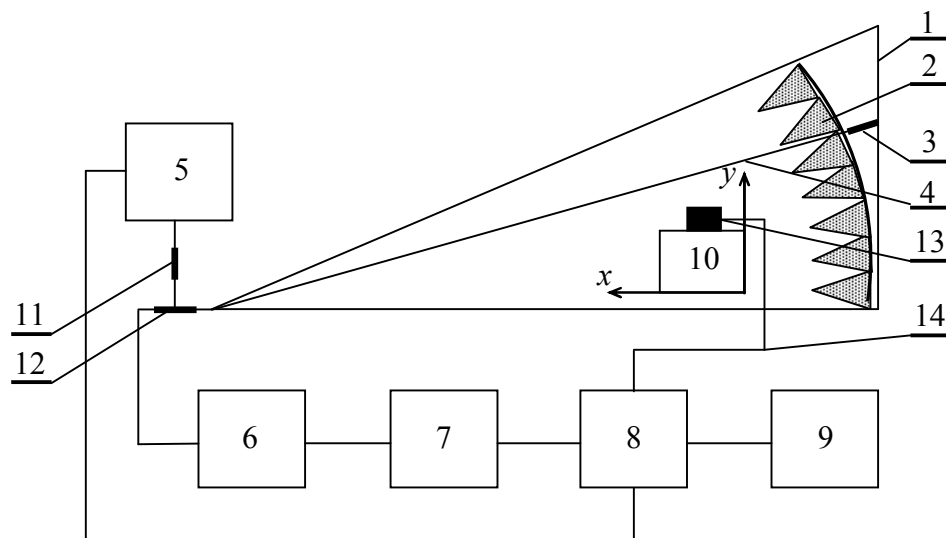


Рисунок 3.52 – Устройство GTEM-камеры и подключение к ней измерительного оборудования

(1 – GTEM-камера; 2 – РПМ; 3 – низкочастотная нагрузка; 4 – центральный проводник;

5 – измеритель мощности; 6 – усилитель; 7 – генератор; 8 – измерительный приёмник;

9 – рабочая станция; 10 – испытуемое оборудование; 11 – датчик мощности; 12 – направленный ответвитель; 13 – зонд измерения напряженности поля; 14 – оптический волновод)

Для моделирования устройства в целом созданы модели элементов конструкции. Такими элементами в GTEM-камерах являются СВЧ-соединитель и РПМ. Для СВЧ-соединителя выбрана ранее использованная модель соединителя в TEM-камере. По геометрическим параметрам (рисунок 3.53а) реального РПМ ACCUSER [260] (рисунок 3.53б) создана модель

(рисунок 3.53в) и выполнено вычисление частотной зависимости $|S_{11}|$ (рисунок 3.54). В качестве модели РПМ в программе CST MWS использована модель материала ECCOSORB.

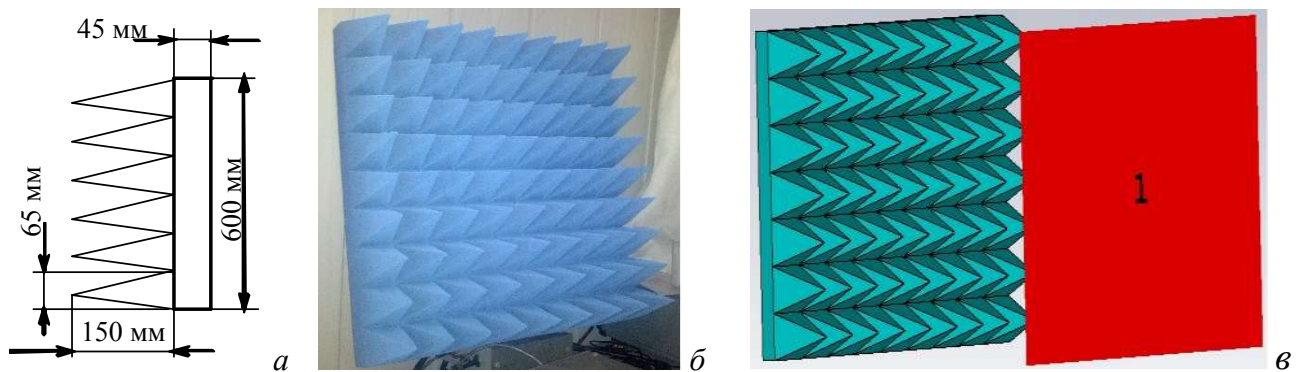


Рисунок 3.53 – Вид сбоку (а) реального РПМ типа ACCUSER (б) и его электродинамическая модель в программе CST MWS (в)

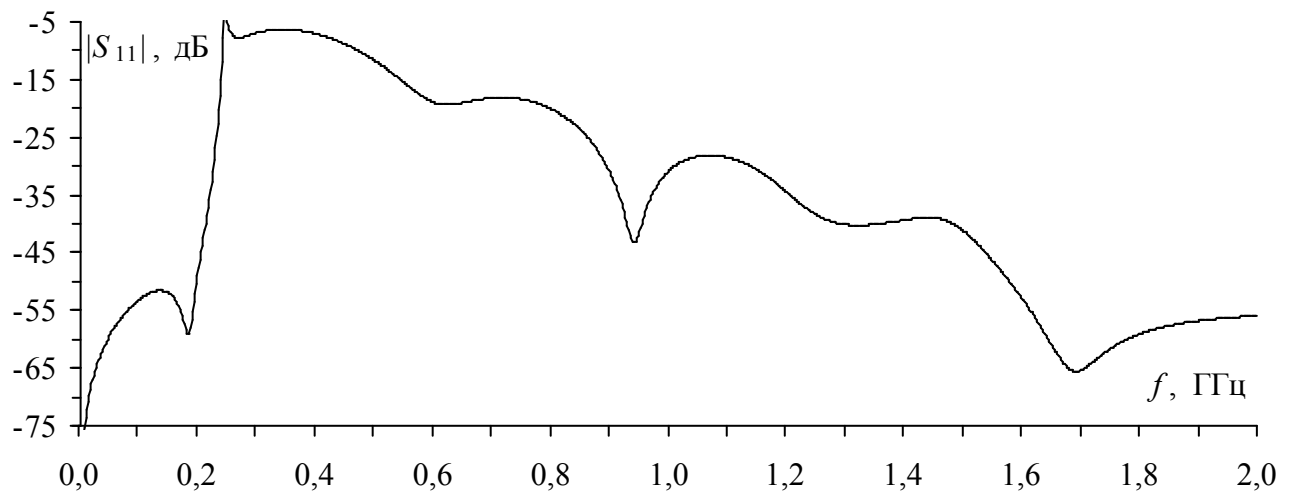


Рисунок 3.54 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ для РПМ ACCUSER

Анализ частотной зависимости $|S_{11}|$ в диапазоне 0,8–2 ГГц показал неперевышение уровня минус 20 дБ, что соответствует паспортным данным РПМ ACCUSER. Резонанс на частотах вблизи 300 МГц с уровнем минус 5 дБ вызван спецификой моделирования РПМ в волноводе 600×600 мм. Таким образом, модель может быть успешно использована в моделях ГТЕМ-камер в диапазоне частот до 2 ГГц. На основе аналитического вычисления и квазистатического анализа создана модель ГТЕМ-камеры открытого типа с максимальными габаритами ИО 250 мм (рисунок 3.55 а). В модели учтено следующее: металл – медь ($\rho=8930 \text{ кг/м}^3$, $\sigma=5,96 \times 10^7 \text{ См/м}$); скругления краёв (рисунок 3.55 б), возникающие в результате изгиба или обработки металла, а также пайки стыков корпуса и центрального проводника; параметры реального соединителя типа SMA и РПМ ACCUSER; воздействием является гауссов импульс, подводимый от плоского волноводного порта с волновым сопротивлением 50 Ом.

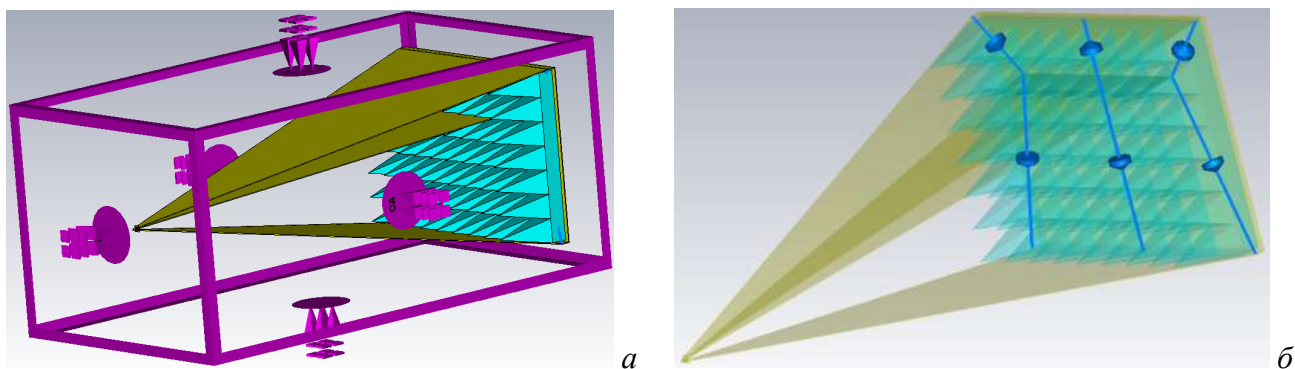


Рисунок 3.55 – Модели GTEM-камеры, с раскрытием 600×470 мм (а)
с согласующими сопротивлениями на конце центрального проводника (б)

В процессе моделирования проводилась параметрическая оптимизация по ширине w и углу (изменением высоты катета h_1) расположения центрального проводника GTEM-камеры. Оптимизация проводилась при излучении поля в свободное пространство, без РПМ для сокращения временных затрат. Целевой функцией являлось максимальное значение частотной зависимости $|S_{11}|$. В результате получены предварительные оптимальные значения размеров поперечного сечения, изгибов, кромок, углов и длин пирамидальной и прямоугольной частей GTEM-камеры: $a=600$ мм; $b=470$ мм; $d=347,9$ мм; $w=403,5$ мм; $L=1178,55$ мм; $t=2$ мм $a'=7$ мм; $b'=8,23$ мм; $w'=4$ мм.

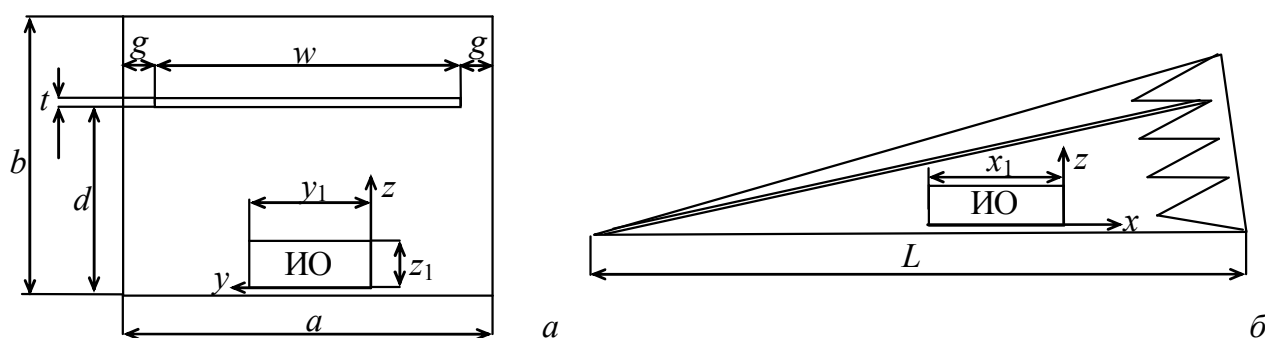


Рисунок 3.56 – Поперечное (а) и продольное (б) сечения GTEM-камеры

Далее вычислена частотная зависимость $|S_{11}|$ в диапазоне рабочих частот до 2 ГГц (рисунок 3.57) при помощи метода матриц линий передач (TLM). Время вычисления на ПК (МП Intel Core I7 4930 K, ОЗУ 64 ГБ, ГП NVIDIA Tesla C2075) составило около 60 ч, при загрузке графического процессора 100 %.

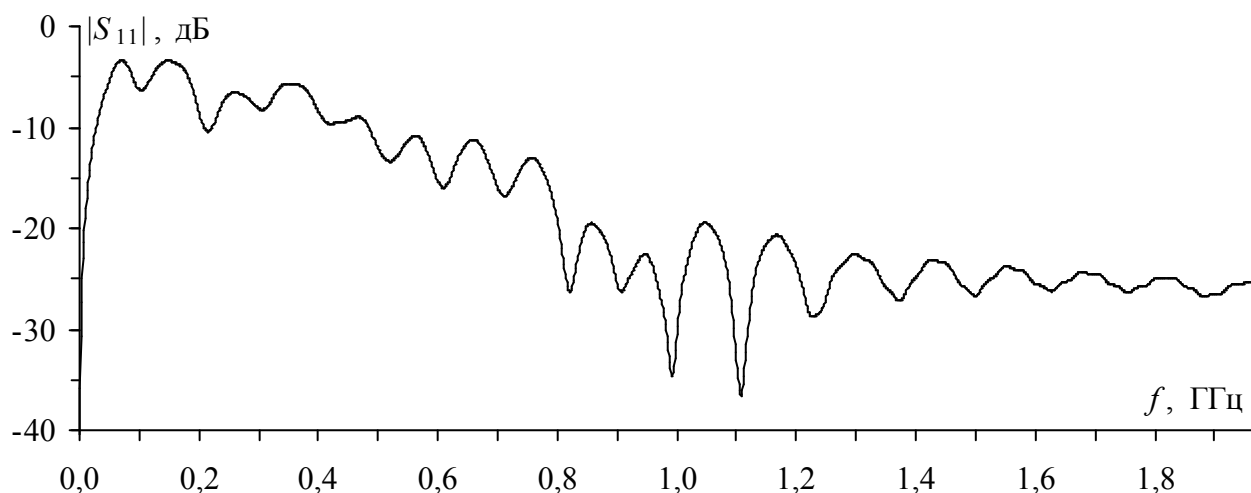


Рисунок 3.57 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ GTEM-камеры

Для вычисления напряженности электрического поля внутри GTEM-камеры, на расстоянии 5 мм над нижней стенкой были размещены 9 датчиков электрического поля (рисунок 3.58), располагаемые на расстоянии 50 мм друг от друга и охватывающие площадь испытательного стола камеры размером 100×100 мм².

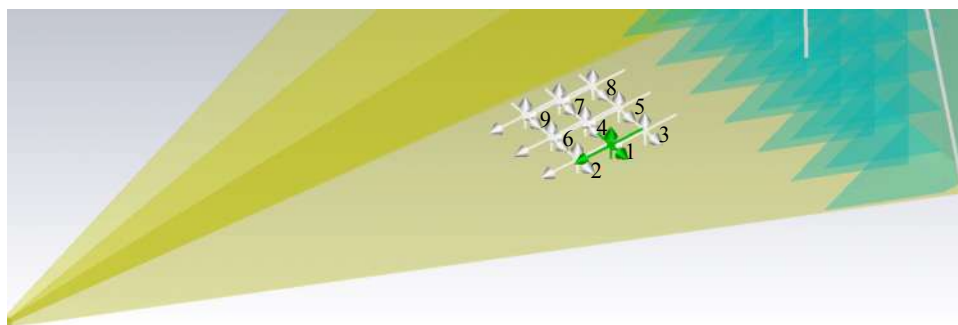


Рисунок 3.58 – Размещение датчиков напряженности электрического поля во внутреннем пространстве GTEM-камеры по периметру и в центре испытательного стола

Вычислены уровни Y -составляющей напряженности электрического поля $|E|$ (рисунок 3.59) в местах расположения датчиков при воздействии гауссовым импульсом на вход камеры.

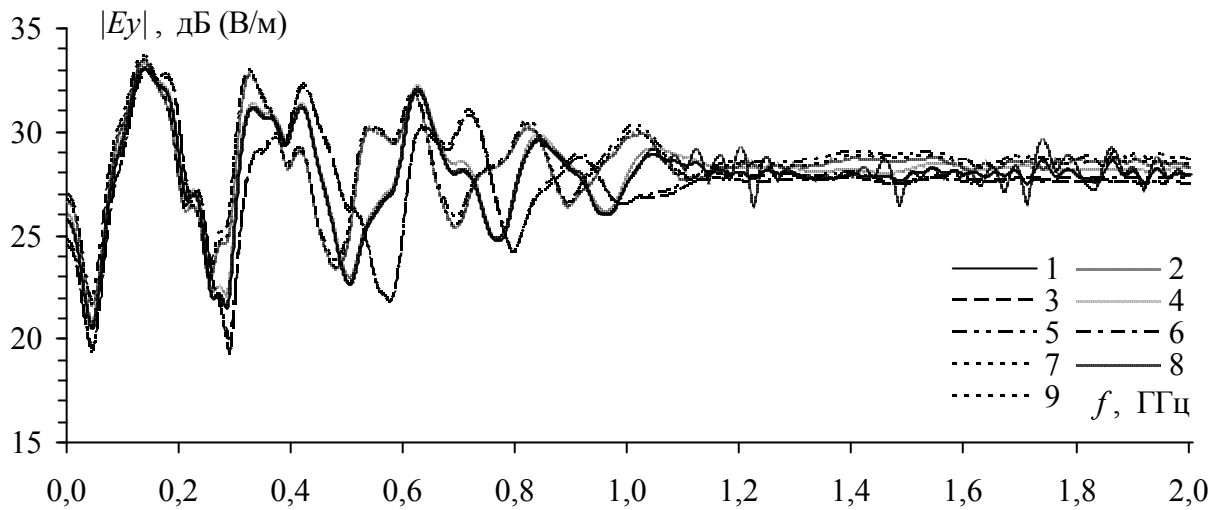
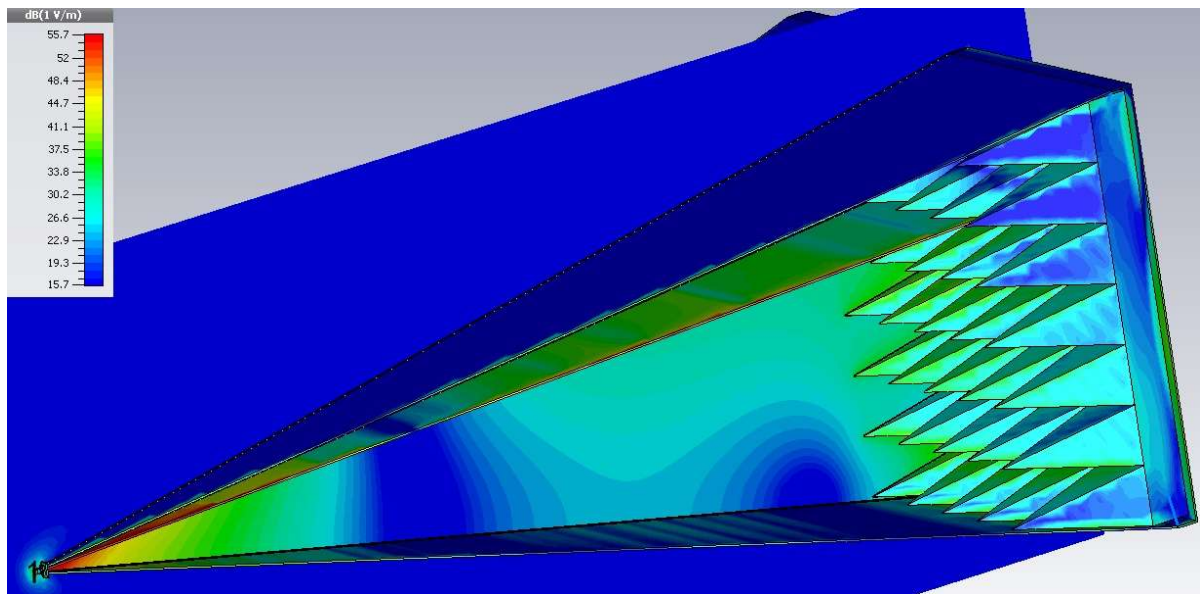


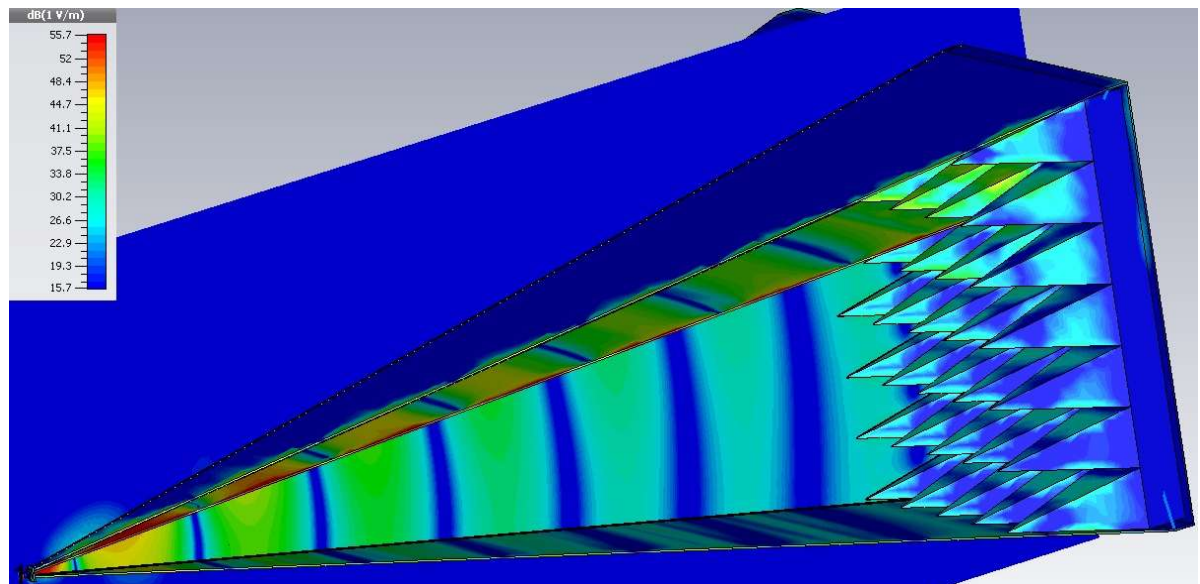
Рисунок 3.59 – Частотные зависимости $|E_y|$, в местах (1–9) расположения датчиков электрического поля над испытательным столом GTEM-камеры

На рисунке 3.60 приведены изображения распространения поля и его поглощения РПМ внутри GTEM-камеры, на частотах 0,2, 1, 2 ГГц. Из представленных изображений и уровней напряженностей электрического поля в местах расположения ИО видно, что в диапазоне частот до 1 ГГц имеется значительная неравномерность распространения поля до ± 10 дБ, что связано с высоким коэффициентом отражения в данной области частот. На частотах выше 1 ГГц поле, распространяющееся в GTEM-камере, более равномерно: ± 5 дБ.

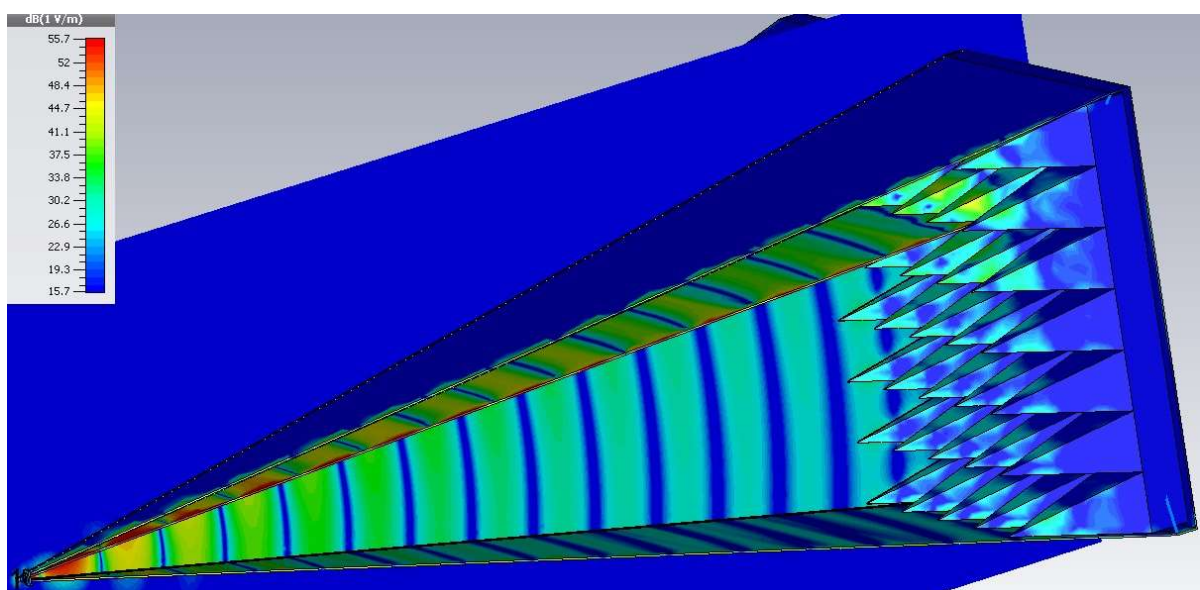
Таким образом, оптимизированы геометрические параметры и вычислена частотная зависимость $|S_{11}|$ для открытой GTEM-камеры. По полученной частотной зависимости видно, что в области низких частот до 0,8 ГГц имеются значительные отражения с максимальным значением, не превышающем минус 3 дБ (КСВН выше 5), связанные с тем, что на низких частотах конец центрального проводника плохо согласован (не имеется сужающихся частей) с нагрузкой 50 Ом. По полученным результатам спроектирован лабораторный макет (рисунок 3.61) GTEM-камеры (250 мм, максимальная высота ИО). В дальнейшем необходимо разработать модель GTEM-камеры так, чтобы лучше согласовать конец центрального проводника с резисторами и провести электродинамический анализ с оптимизацией полученной структуры. Согласование для модели центрального проводника возможно выполнить при помощи линейного сужения конца центрального проводника, например введением нескольких треугольных вырезов. Это обеспечит равномерность распространения ЭМП, как на высоких, так и на низких частотах.



а



б



в

Рисунок 3.60 – Модуль общего значения напряженности электрического поля
на частотах: 0,2 (а), 1 (б), 2 (в) ГГц



Рисунок 3.61 – Модель лабораторного макета открытой камеры GTEM-250 на передвижной подставке для приборов

3.4 Полосковая линия

Разработана ПЛ для испытаний на ЭМС. В качестве исходной конструкции выбрана геометрическая структура (рисунок 3.62) из нормативного документа [152]. Параметры структуры: w_g – 1500 мм, w_s – 740 мм, l_g – 4300 мм, l_t – 800 мм, l_s – 2500 мм, h_s – 150 мм, t_s – 2 мм, t_g – 5 мм. Видно, что раскрыв проводника соединяется с центральным проводником СВЧ-соединителя ($h_{ui}=1$ мм) через отверстие в основании ПЛ. Одной из основных характеристик ПЛ является частотная зависимость $|S_{11}|$, которая определяет равномерность поля вдоль полоски и полноту его поглощения, в конце линии, в нагрузке 50 Ом. Выполнено электродинамическое моделирование и оптимизация ПЛ. Целью оптимизации являлась минимизация максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 400 МГц. Параметрами оптимизации выбраны следующие: ширина полоски w_s , длина раскрыва l_t и высота раскрыва h_{ui} . В результате получены следующие оптимизированные значения геометрических параметров ПЛ: l_t – 796,63 мм; w_s – 736,96 мм; h_{ui} – 0,56 мм. Для сравнения результаты вычисления частотной зависимости $|S_{11}|$, в диапазоне частот от 0 до 400 МГц, по описанным геометрическим параметрам [152] и её оптимизированной модели, приведены на рисунке 3.63.

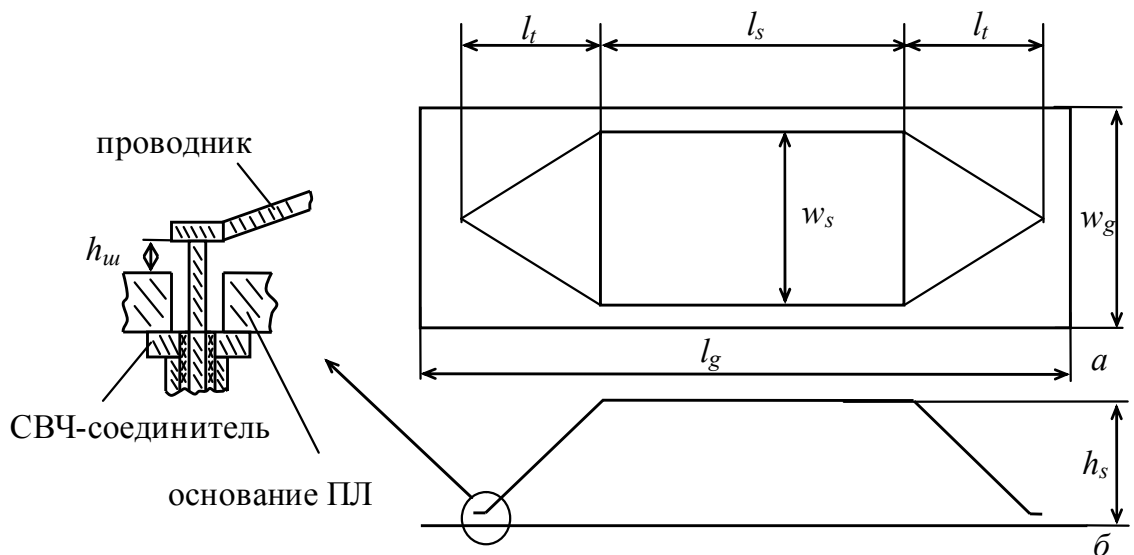


Рисунок 3.62 – Виды сверху (а) и сбоку (б) конструкции ПЛ [5]

с местным видом продольного сечения соединения проводника с СВЧ- соединителем (в)

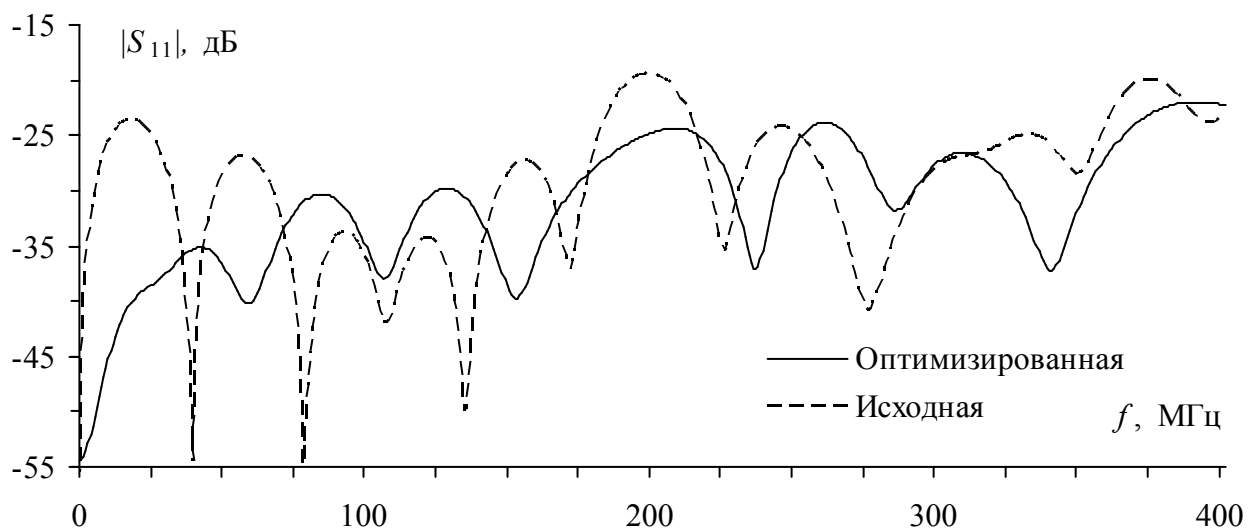


Рисунок 3.63 – Частотные зависимости $|S_{11}|$: для ПЛ из [152] (---)

и ее оптимизированной модели (—)

Как видно из рисунка 3.63, частотная зависимость $|S_{11}|$ оптимизированной модели не превышает минус 22 дБ, тогда как $|S_{11}|$ исходной – минус 19 дБ. Это уменьшило максимальное значение КСВН с 1,24 до 1,17.

3.5 Основные результаты главы

Приведены результаты проектирования устройств для испытания на ЭМС, на основе линий передачи. Представлены алгоритмы и методики, позволяющие оптимизировать структуру и геометрические параметры ТЕМ-камеры. Изложен методика оптимизации геометрических размеров ТЕМ-камеры с применением численных методов, позволяющая учитывать реальные

неточности, возникающие при создании сложных форм конструкций волноводов из металла. Разработаны электродинамические и твердотельные модели ТЕМ-камер, для вычисления оптимальных геометрических размеров, на основе которых может быть изготовлена ТЕМ-камера, для высоты ИО от 5 до 40 мм. Также, с помощью данной методики можно оценить изменения частотной зависимости $|S_{11}|$ вследствие реализации твердотельной модели со всевозможными практическими изменениями заготовки, с целью придания ей формы на основе электродинамической модели. Создана ТЕМ-камера, которая превышает характеристики существующих камер по диапазону частот и высоте ИО и пригодна для исследований и испытаний согласно стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость ИС, небольших габаритов РЭА, а также БО, представляющих собой клетки и ткани живых организмов и растений. Камера имеет максимальное значение $|S_{11}|$ (по результатам измерений) минус 20 дБ, в диапазоне частот до 2 ГГц, при максимальной высоте ИО 20 мм. Наихудшее значение ЭЭ, в данном диапазоне составляет (по результатам моделирования) минус 10 дБ, что может быть повышено при помощи применения дополнительных экранирующих прокладок и вставок. Для увеличения полезного объема камеры, под высоту ИО до 40 мм, представленные размеры могут быть линейно увеличены в два раза, при этом полоса рабочих частот камеры уменьшится до 1 ГГц. Разработана ТЕМ-камера, на внутренних боковых стенках которой нанесен мюметалл, что позволило расширить диапазон рабочих частот до 3 ГГц при $|S_{11}|$, не превышающем минус 15 дБ. Показано, что мюметалл оказывает значительное влияние на частотную зависимость $|S_{21}|$, который в диапазоне рабочих частот до 3 ГГц имеет максимальное значение минус 12 дБ. Разработаны миниатюрные ТЕМ-камеры, для измерения ЭЭ материалов и БО высотой до 5 мм, при $|S_{11}|$ не более минус 20 дБ в диапазоне частот до 7 ГГц.

Впервые приведена разработанная КЭК для совместных климатических и электромагнитных испытаний на ЭМС с возможностью её применения для биомедицинских исследований. Камера позволит получить новые знания о взаимовлиянии внутренних и внешних электромагнитных и климатических воздействий на ТЕМ-камеру и на ИО, размещенный в её внутреннем объёме. Представлен облик КЭК, 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. Методы испытаний могут быть при необходимости скорректированы под определенную задачу.

Заключение

При выполнении диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Приведено аналитическое выражение для коэффициента связи апертуры с корпусом, позволяющее реализовать быструю оценку ЭЭ корпусом с апертурой в диапазоне частот от 10 кГц до 20 ГГц.
2. Выполнена программная реализация представленных моделей в виде модулей в программе TALGAT, позволяющих произвести быструю оценку ЭЭ прямоугольного металлического корпуса с апертурой, а также пластины из различных металлов для электрического, магнитного и электромагнитного полей.
3. Показано, что зависимости, полученные при помощи программы CST MWS и реализованного модуля в программе TALGAT, совпадают, а на основе реализованных модулей получены полезные оценки ЭЭ бортовой РЭА КА.
4. Показано, что при экранировании металлической пластиной переход от алюминия к более легкому сплаву магния ухудшает ЭЭ. Этот переход может оказаться критичным для экранирования низкочастотного магнитного поля.
5. Вычислена ЭЭ корпуса блока САН и предложены рекомендации по её повышению.
6. Приведены результаты проектирования устройств для испытаний на ЭМС на основе линий передачи.
7. 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, на основе которых может быть изготовлена ТЕМ-камера для высоты ИО от 5 до 40 мм.
8. Создана ТЕМ-камера, которая превышает характеристики существующих камер по диапазону частот и высоте ИО и пригодна для исследований и испытаний согласно стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость ИС, малогабаритной РЭА, а также БО, представляющих собой клетки и ткани живых организмов и растений.
9. Разработана ТЕМ-камера, на внутренних боковых стенках которой нанесен мюметалл, что позволило расширить диапазон рабочих частот до 3 ГГц при $|S_{11}|$, не превышающем минус 15 дБ.
10. Разработаны миниатюрные ТЕМ-камеры, для измерения ЭЭ материалов и БО высотой до 5 мм, при $|S_{11}|$ менее минус 20 дБ в диапазоне частот до 7 ГГц.

11. Разработана КЭК для совместных климатических и электромагнитных испытаний на ЭМС и выполнена оценка возможности её применения для биомедицинских исследований.

12. Представлен облик КЭК, разработаны технические требования, приведены технические характеристики и разработаны методы применения КЭК для испытаний на ЭМС, а также для биомедицинских исследований.

Список использованных источников

1. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.
2. ECSS-E-HB-20-07A (2012), Space engineering – Space systems electromagnetic compatibility handbook.
3. Bogorad A.L. Shielding effectiveness and closeout methods for composite spacecraft structural panels / Bogorad A.L., Deeter M. P., August K.A., Doorley G., Likar J.J., Herschitz R. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2008. – Vol. 50, № 3. – P. 547–555.
4. ГОСТ Р 56093-2014. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Средства обнаружения преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие требования.
5. ГОСТ Р 56103-2014. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Организация и содержание работ по защите от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие требования.
6. ГОСТ Р 56115-2014. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Средства защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие требования.
7. Комягин С.И. Необходимость и пути совершенствования электромагнитных испытаний. / С.И. Комягин, Д.И. Еряшев, М.А. Лавишев // Технологии ЭМС. – 2010. – №4. – С. 22–26.
8. Кечиев Л.Н. Виртуальная сертификация радиоэлектронной аппаратуры по уровню помехоэмиссии. Постановка проблемы. / Л.Н. Кечиев, Н.В. Лемешко // Технологии ЭМС. – 2010. – №2. – С. 3–15.
9. Baan R. et al. Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields // The Lancet Oncology. – 2011. – Vol. 12, №7. – P. 624–626.
10. Пат. 7532473 США, МПК H05K7/20. Cooling apparatus with electromagnetic interference shielding function / Kuo Szu-Wei (TW). – № 11/681192; заявл. 02.03.2007; выдан 12.05.2009.
11. Пат. 7804687 США, МПК H05K7/20. Liquid-cooled rack with pre-cooler and post-cooler heat exchangers used for EMI shielding / Copeland David W., Masto Anrew R., Vogel Marlin R. (US). – № 12/188734; заявл. 08.08.2008; выдан 28.09.2010.
12. Пат. 7285732 США, МПК H05K9/00. Ultra-low height electromagnetic shielding

- enclosure /Vinokor Igor, Pirkhalo Vladislav, Shlahtichrman Anatoliy, Smyk Eugene, Favela Zollo Anthony, English Gerald (US). – № 11/495995; заявл. 18.01.2007; выдан 23.11.2007.
13. Пат. 7570496 США, МПК H05K9/00. Electromagnetic interference shielding apparatus for signal transceiver /Chen Ruei Yuen, Kuo Fang Yu, Huang Yi Hsiang (TW). – № 11/896230; заявл. 30.08.2007; выдан 04.08.2009.
 14. Пат. 7280368 США, МПК H05K7/02. EMI shielding techniques using multiple EMI shields which share the same circuit board holes / Iwamiya Edward, Hanners John. (US). – № 11/238249; заявл. 29.09.2005; выдан 09.10.2007.
 15. Пат. 7150653 США, МПК H01R13/648. Techniques for EMI shielding of a transceiver module / Mason Todd (US). – № 11/231475; заявл. 21.09.2005; выдан 19.12.2006.
 16. Пат. 4827378 США, МПК H05K9/00. Jack coaxial connector EMI shielding apparatus / Gillian Robert L., Kosanda David E. (US). – № 206781; заявл. 15.06.1988; выдан 02.05.1989.
 17. Пат. 7196275 США, МПК H05K9/00. EMI shield that adheres to and conforms with printed circuit board surfaces / Babb Samuel M., Kolb Lowell E., Davis Brian, Mankin Jonathan P., Mann Kristina L., Mazurkiewicz Paul H., Wahlen Marvin (US). – № 10/252303; заявл. 23.12.2003; выдан 27.05.2007.
 18. Пат. 6023415 США, МПК H05K9/00. Apparatus for electro-magnetic interference (EMI) and radio frequency interference (RFI) containment with in a chassis / Mayer David, Dean Ronald P., Hoppal John P., Seader Rex (US). – № 08/940414; заявл. 30.09.1997; выдан 08.02.2000.
 19. Пат. 6018125 США, МПК H02K9/00. High frequency EMI shield with air flow for electromagnetic device enclosure / Collins Pat Eliot, Bruning III Theodore Ernst, Carlson Grant Edward (US). – № 08/751127; заявл. 15.11.1996; выдан 25.01.2000.
 20. Пат. 5136119 США, МПК H05K9/00. Lightweight portable EMI shielding container / Leyland Walter E. (US). – № 761562; заявл. 18.09.1991; выдан 04.08.1992.
 21. Пат. 5783771 США, МПК H05K9/00. EMI chassis seam / Copeland Jeffrey P., Robinson Dennis C. (US). – № 550787; заявл. 06.10.1995; выдан 21.07.1998.
 22. Пат. 5323298 США, МПК H05K9/00. Integral enclosure and shield for EMI radiating circuitry / Shatas Remigius G., Brown Steven F. (US). – № 912769; заявл. 13.07.1992; выдан 21.06.1994.
 23. Пат. 6566973 США, МПК H01P5/00. EMI enclosure having a waveguide for cables / Schumacher Richard A. (US). – № 09/944826; заявл. 31.08.2001; выдан 20.05.2003.
 24. Пат. 5698818 США, МПК H05K9/00. Two part closely coupled cross polarized EMI shield /

- Brench Colin Edward (US). – № 629292; заявл. 08.04.1996; выдан 16.12.1997.
25. Пат. 7588461 США, МПК H01R13/648. Mating connectors with a continuous EMI shield / Tyler Adam Price (US). – № 12/043172; заявл. 06.03.2008; выдан 15.09.2009.
 26. Пат. 6646197 США, МПК H05K9/00. High performance EMI shield for electronic equipment / Cugalj Darko, Przybycien Paul (US). – № 09/562624; заявл. 02.05.2000; выдан 11.11.2003.
 27. Пат. 7342184 США, МПК H01R4/48. Three-dimensional configurations providing electromagnetic interference shielding for electronics enclosures / Cochrane Paul Douglas (US). – № 11/275902; заявл. 02.02.2006; выдан 11.03.2008.
 28. Пат. 6932647 США, МПК H01R13/648. Connector enhanced in electromagnetic shielding function / Murayama Ryusuke (JP). – № 10/846639; заявл. 17.05.2004; выдан 23.08.2005.
 29. Пат. 7473135 США, МПК H01R13/648. High-density connector with EMI shielding / Guo Xiaosong, Ip Michael, Xiao Ran. (CN). – № 11/942717; заявл. 20.11.2007; выдан 06.01.2009.
 30. Пат. 7061775 США, МПК H05K9/00. Power converter having improved EMI shielding / Beihoff Bruce C., Kehl Dennis L., Gettelfinger Lee A., Kaishian Steven C., Phillips Mark G., Radosevich Lawrence D. (US). – № 10/252303; заявл. 23.12.2003; выдан 13.06.2006.
 31. Пат. 6717047 США, МПК H01B7/00. EMI enclosure having a flexible cable shield / Haselby Jeffrey T., Peterson Eric C. (US). – № 09/940399; заявл. 27.08.2001; выдан 06.04.2004.
 32. Пат. 6705897 США, МПК H01R13/648. Rear-end electromagnetic shielding component of an electronic connector / Chen Li-Sen, Jang Ben-Hwa, Chen Chao-Tsu (TW). – № 10/601569; заявл. 24.06.2003; выдан 16.03.2004.
 33. Пат. 6595801 США, МПК H01P13/648. Electrical connector with electrically isolated ESD and EMI shields / Leonard Russell J., Gardner Michael J. (US). – № 08/866395; заявл. 30.05.1997; выдан 22.07.2003.
 34. Пат. 7168986 США, МПК H01R13/648. Board-to-board connector assembly with EMI shielding shields / Peng Yung Chi. (TW). – № 11/384783; заявл. 21.03.2006; выдан 30.01.2007.
 35. Пат. 6225565 США, МПК H01B11/06. Flixible cable providing EMI shielding / Prysner William J. (US). – № 09/337222; заявл. 07.06.1999; выдан 01.05.2001.
 36. Пат. 7235737 США, МПК H01B11/06. Electromagnetic shielding sleeve which is intended, for example, to protect bundles of cables for use in aeronautics/ Rodrigues Thierry, Leron Andre, Dumont Fabrice, Koch Ranier (FR). – № 10/550727; заявл. 22.03.2004; выдан

27.06.2007.

37. Пат. 7375291 США, МПК H05K9/00. Strip gaskets for EMI shielding / Ariel John C. (US). – № 11/436359; заявл. 18.05.2006; выдан 20.05.2008.
38. Пат. 7659483 США, МПК H05K9/00. Electroactive polymer compressed gasket for electromagnetic shields / Gilliland Don A., Lau Sophia S. (US). – № 12/124324; заявл. 21.05.2008; выдан 09.02.2010.
39. Пат. 6451374 США, МПК B05D5/12. Manufacture of low closure force, form-in-place EMI shielding gasket / Watchko George R., Boland David P., Shah Rakesh N., Gagne Dean R., Sousa Todd E. (US). – № 09/703240; заявл. 31.10.2000; выдан 17.09.2002.
40. Пат. 7622407 США, МПК B05D5/12. Multiplanar EMI shielding gasket and method of making / Kaplo Joseph J. (US). – № 11/307370; заявл. 03.02.2006; выдан 24.11.2009.
41. Пат. 6720494 США, МПК H05K9/00. Cabinet gasket providing panel adhesion and electromagnetic interference shielding / Norte David A., Yoon Woong K. (US). – № 10/272240; заявл. 15.10.2002; выдан 13.04.2004.
42. Пат. 6348654 США, МПК H05K9/00. Compound waveform gasket for low closure force EMI shielding applications / Zhang Kai, Harris Michael D., Ventura Daniel S. (US). – № 09/689925; заявл. 12.10.2000; выдан 19.02.2002.
43. Пат. 7527506 США, МПК H01R4/66. EMI shielding electrical/grounding members / Ball Shelby, Hamand Karl (US). – № 11/968333; заявл. 02.01.2008; выдан 05.05.2009.
44. Пат. 6294729 США, МПК H05K9/00. Clad polymer EMI shield / Kaplo Joseph J. (US). – № 08/962417; заявл. 31.10.1997; выдан 25.09.2001.
45. Пат. 5996220 США, МПК H01R43/00. Method of terminating an EMI shielding gasket / Spies George H., Hamel Richard A., Mitchell Jonathan E., Lionetta William, Bradley James A. (US). – № 09/097033; заявл. 12.06.1998; выдан 07.12.1999.
46. Пат. 7504591 США, МПК H05K9/00. Electromagnetic shielding gasket and electronic device provided therewith / Awaji Teizon (JP). – № 11/972507; заявл. 10.01.2008; выдан 17.03.2009.
47. Пат. 6283770 США, МПК H01R4/66. Minimal intrusion EMI shielding clip to maintain electrical contact between two parallel surfaces / Leung Jimmy Che-Kin, Eastman Scott A., Hurst Douglas J. (US). – № 09/210353; заявл. 11.12.1998; выдан 04.09.2001.
48. Пат. 4474676 США, МПК C04B35/04. Electromagnetic interference shielding material / Ishino Ken, Hashimoto Yasuo, Narumiya (JP). – № 522580; заявл. 12.08.1983; выдан 02.10.1984.

49. Пат. 4404125 США, МПК H01B1/06. Polyphenylene ether resin compositions for EMI electromagnetic interference shielding / Abolins Visvaldis, Bopp Richard C., Caraher Joel M., Lovgren Eric M. (US). – № 311268; заявл. 14.10.1981; выдан 13.09.1983.
50. Пат. 5278562 США, МПК H01Q17/00. Method and apparatus using photoresistive materials as switchable EMI barriers and shielding / Martin Michael T., Duhl Michael L. (US). – № 927703; заявл. 07.08.1992; выдан 11.01.1994.
51. Пат. 7608326 США, МПК B32B27/00. Thermally conductive EMI shield / Johnson Richard Norman (US). – № 10/531890; заявл. 21.10.2003; выдан 27.10.2009.
52. Пат. 4566990 США, МПК C08K7/06. Synergistic effect of metal flake and metal or metal coated fiber on EMI shielding effectiveness of thermoplastic / Liu Nan-I, Roelof van der Meer (ND). – № 545339; заявл. 25.10.1983; выдан 28.01.1986.
53. Пат. 4909901 США, МПК D21H1/02. EMI and RFI shielding and antistatic materials and processes for producing the same / McAllister Richard G., McEnroe Lawrence E., III (EN). – № 101938; заявл. 28.09.1987; выдан 20.03.1990.
54. Пат. 7815820 США, МПК H01B1/02. Electromagnetic interference shielding polymer composites and methods of manufacture / Tan Daniel Qi, Cao Yang, Irwin Patricia Chapman (US). – № 11/863831; заявл. 18.10.2007; выдан 19.10.2010.
55. Пат. 5827997 США, МПК H05K9/00. Metal filaments for electromagnetic interference shielding / Chung Deborah D.L., Shui Xiaoping(US). – № 328266; заявл. 30.09.1994; выдан 27.10.1998.
56. Пат. 6909615 США, МПК H05K9/00. Equipment and methods for producing continuous metalized thermofable EMI shielding material / Arnold Rocky R., Zarganis John C. (US). – № 10/664838; заявл. 17.09.2003; выдан 21.06.2005.
57. Schaffar A. Application of the power balance method to E field calculation in the ARIANE 5 launcher payloads cavities. / Schaffar A., Gineste P.N. // 2011 IEEE Int. Symp.on Electromagn. Compatibility, 2011. – P. 284–289.
58. Liu Q-F. Shielding effectiveness of apertures in a rectangular cavities / Liu Q-F., Yin W-Y., Mao J-F., Chen Z. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1989. – Vol. 31, № 1. – P. 102–106.
59. Dehkhoda P Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM./ Dehkhoda P., Tavakoli A., Azadifar M. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2012. – Vol. 54, № 4. –

P. 792–805.

60. Araneo R. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects. / Araneo R., Lovat G. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2009. – Vol. 51, № 2. – P. 274–283.
61. Liu Q-F. Accurate characterization of shielding effectiveness of metallic enclosures with thin wires and thin slots / Liu Q-F., Yin W-Y., Mao J-F., Chen Z. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2009. – Vol. 51, № 2. – P. 293–300.
62. Shim J. Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure. / Shim J., Kam D.G., Kwon J.H., Kim J. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2010. – Vol. 52, № 3. – P. 566–577.
63. Бутин В.И. Эффективность экранирования металлических корпусов РЭА в СВЧ-диапазоне при волновом режиме электромагнитного воздействия. / В.И. Бутин, П.Я. Кундышев. // Технологии ЭМС. – 2012. – №4. – С. 7–17.
64. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture. / J.R. Solin // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2011. – Vol. 53, № 1. – P. 82–90.
65. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with an electrically large aperture. / J.R. Solin // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2012. – Vol. 54, № 1. – P. 188–192.
66. Гизатуллин З.М. Повышение эффективности экранирования металлических корпусов электронных средств. / З.М. Гизатуллин // Технологии ЭМС. – 2010. – №3. – С. 37–43.
67. Вялов В.А. Оценка характеристик электромагнитного поля внутри перфорированной металлической оболочки при внешних электромагнитных воздействиях / В.А. Вялов, Б.Н. Городецкий, В.В. Залипаев // Технологии ЭМС. – 2016. – №1(56). – С. 55–67.
68. Robinson M. P. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture. / M.P. Robinson, J.D. Turner, D.W.P. Thomas, et al. // Electron Lett. – 1996. – Vol. 32, № 17 – P. 1559–1560.
69. Robinson M.P. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. / M.P. Robinson, T.M. Benson, C. Christopoulos, et al. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1998. – Vol. 40, № 3. – P. 240–248.
70. Thomas D.W.P. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. / D.W.P. Thomas, A.C. Denton, T. Konefal, et al. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2001. – Vol. 43, № 2. – P. 161–169.

71. Shi D. 3 High-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture. / D. Shi, Y. Shen, Y. Gao // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. –2007. – P.361–364.
72. Belkacem F.T. Combined model for shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with apertures./ F.T. Belkacem, M. Bensetti, A.G.Boutar et al.// IET Sci. Meas. Technol. – 2011. – Vol. 5, Iss. 3. – P. 88–95.
73. Azizi H. Electromagnetic interference from shielding effectiveness of a rectangular enclosure with apertures – circuital approach, FDTD and FIT modelling. / Azizi H., Belkacem F.T. et al. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2014. – Vol. 28, № 4. – P. 494–514.
74. CST MICROWAVE STUDIO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cst.com/products/CSTMWS>, свободный (дата обращения: 25.10.2015).
75. Gupta K.C., Grag R., Bahl I. J. Microstrip Lines and Slot Lines. Norwood, MA: Artech House, 1979, ch. 7.
76. Schelkunoff S.A. Electoromagnetic waves. / S.A. Schelkunoff// Van Nostrand. – 1943. – 530 p.
77. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. // М.: Радио и связь, 1989. – 229 с.
78. Кечиев Л.Н.. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. – Группа ИДТ, Издательский Дом «Технологии». – 2010. – 472 с.
79. Kühn M. Analytical calculation of intrinsic shielding effectiveness for isotropic and anisotropic materials based on measured electrical parameters. / M. Kühn, W. John, R. Weigel // Adv. Radio Sci. – 2014. – №12. – P. 83–89.
80. Rai M. Characterization of Shielding Effectiveness of General Metallized Structure. / Rai M. Yadav R.K. // I.J. Wireless and Microw.Tech. – 2014. – № 5. – P.32–45.
81. ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com>, свободный (дата обращения: 25.11.2015).
82. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. / Д.Н. Шапиро // Л.:Энергия, Ленинград, 1975, 109 с.
83. Ott H.W. Noise reduction techniques in electronic systems / Pub. by John Wiley&Sons, Inc. 225 p.

84. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Дисс докт.тех. наук. Томск. 2010
85. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач. / Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. // М.: Наука. – 1979. – 285 с.
86. Захаров Е.В. Численный анализ дифракции радиоволн. / Е.В. Захаров, Ю.В. Пименов // М.: Радио и связь. 1982. – 184 с.
87. Давыдов А.Г. Метод численного решения задач дифракции электромагнитных волн на незамкнутых поверхностях произвольной формы. / Давыдов А.Г., Захаров Е.В., Пименов Ю.В. // ДАН СССР. – 1984. – Том.276, №1. – С. 96–100.
88. Boghosian M. Magnetic testing, and modeling, simulation and analysis for space applications. / Boghosian M., Narvaez P., Herman R. // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). – 2013. – P. 265–270.
89. Kunze M. Solving large Multi-scale problems in CST STUDIO SUITE an aircraft application. / M. Kunze, Z. Reznicek, I. Munteanu et al. // Int. Conf. on Electromagn. in Adv. Applic. (ICEAA). – 2011. P. 110–113.
90. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic shielding / S. Celozzi, R. Araneo, G. Lovat // Wiley-Interscience. – 2008. – 376 p.
91. Department of Defence. MIL-STD 285. Military standard. Method of Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes. – 1997.
92. IEEE Std-299–2006. IEEE Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway. – 2007.
93. Department of Defence. MIL-STD-461F. Interface Standard, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. – 2007.
94. Groh C. TEM waveguides for EMC measurements. / C. Groh, J.P. Karst, M. Koch, H. Garbe. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1999. – Vol.41, №4. – P. 440–445.
95. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1974. – Vol. 16, №4. – P. 189–195.
96. Carbonini L. Theoretical and experimental analysis of a multi-wire rectangularly shielded transmission line for EMC measurements. / L. Carbonini // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. – 1991. – P. 8–13.

97. Hansen D. Comparing the field quality of the new EUROTREM to GTEM and fullyabsorber lined chambers. / D. Hansen, J. Funck, D. Ristau, et al. // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. – 1998. – P. 132–136.
98. D. Hansen A broadband alternative EMC test chamber based on a TEM-cell anechoic-chamber hybrid concept. / D. Hansen, P. Wilson, D. Konigstein, et al. //IEEE In Proc. of Int. Symp. on Electromagn. Compat. – 1989. Nagoya, Japan. – P. 133–137.
99. Integrated Circuits Measurement of Electromagnetic Emissions Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005.
100. Integrated Circuits Measurement of Electromagnetic Immunity Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edition, 2010.
101. Lin H.-N. Analysis of EMI effect on flash memory IC / Lin H.-N., Kuo C.-W., Cheh C.-K., et al. // Asia-Pacific Symp. Electromag. Compat. (APEMC). – 2012. – P. 757–760.
102. Мещеряков С.А. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при воздействии мощного СВЧ импульса. Биполярные транзисторы. / С.А. Мещеряков // Журнал Радиоэлектроники, – 2013, № 12. – С. 1–15.
103. Пирогов Ю.А. Повреждение интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал Радиоэлектроники. – 2013. – №6 – С. 1–38.
104. Park H.H. An EMI Evaluation Method for Integrated Circuits in Mobile Devices / Park H. H., Jang H.-T., Park H.-B., et al. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2013. – Vol. 55, No. 4. – P. 780–787.
105. Lingling Y. A method for the radiated emission test of IC modules. / Lingling Y., Coll X., Haiyan S., et al. // IEEE 16th Int. Conf. on Electronic Packaging Tech. (ICEPT). – 2015. – P. 972–974.
106. Catrysse J. Expanding the frequency range of the TEM-t cell for the measurement of shielding materials up to 12 GHz. / Catrysse J., Vanhee F., Pissort D., et al. // Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC EUROPE). – 2012. – P. 1–6.
107. Жегов Н.А. Сравнение методов исследования эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов / Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., и др. // Технологии ЭМС – 2015. – Т. 52, № 1. – С. 44–48.
108. Park S-H. Analysis of EMI reduction methods of DC-DC buck converter / S-H. Park, H-A.

- Huynh, S-Y. Kim // IEEE 10th Int. Workshop on the Electromagn. Compat. of Integrated Circuits (EMC Compo) – 2015. – Edinburgh P. 92–96.
109. Senic D. Shielding effectiveness measurements in resonant enclosure using mode-tuned and mode-stirred method. / Senic D., Sarolic A. // 21st Int. Conf. on Applied Electromagn. and communications (ICECom). – 2013. – P. 1–4.
 110. Mandic T. Characterizing the TEM cell electric and magnetic field coupling to PCB transmission lines. / T. Mandic, R. Gillon, B. Nauwelaers // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2012. – Vol. 54, №5. – P. 976–985.
 111. Shi C. Using termination effect to characterize electric and magnetic field coupling between TEM cell and microstrip line. / Shi C., Fang W., Chai C. Huang Y. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2015. – Vol. 57, Iss. 6. – P. 1338–1344.
 112. Kohler S. Experimental Microdosimetry Techniques for Biological Cells Exposed to Nanosecond Pulsed Electric Fields Using Microfluorimetry. / S. Kohler, R.P. O'Connor, Thi Dan Thao Vu, et al. // IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech. – 2013. – Vol. 61, № 5 – P. 2015–2022.
 113. Arnaud-Cormos D. Specific Absorption Rate Assessment Using Simultaneous Electric Field and Temperature Measurements. / Arnaud-Cormos D., Duvillaret L., Gaborit G., et al. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2012. – Vol. 11. – P. 252–255.
 114. Allan J. Microwave radiation induces a heat-shock response and enhances growth in the nematode *Caenorhabditis elegans*. / Allan J., Candido P., Daniells C., et al. // IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn. – 2000. – Vol. 48, № 11. – P. 2076–2081.
 115. Frankonia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.frankoniagroup.com>, свободный (дата обращения 16.11.2015).
 116. Teseq [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.teseq.com>, свободный (дата обращения 16.11.2015).
 117. Instruments for industry, TEM cell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ifi.com/images/stories/pdfs/TEM_Cells_IFI_CC_series.pdf, свободный (дата обращения 16.11.2015).
 118. Сафронов С.И. Численный анализ рассеяния электростатического поля двухэлектродной камеры на проводящих поверхностях / С.И. Сафронов, Р.П. Тарасов // Журнал технической физики. – 1999. Т.69, №6. – С. 1–10.
 119. Рахаева Е.А. Методы расчета и анализ характеристик электромагнитных полей в TEM-

камерах. Дисс кан. физ.-мат. наук. Самара. 2008.

120. Hese J.V. Simulation of the effect of inhomogeneities in TEM transmission cells using the FDTD-method / Hese J.V., Martens L., Zutter D.D., et al. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1992. – Vol. 34, № 3. – P. 292–297.
121. Holloway C.L. A Comparison of the Currents Induced on an EUT in a TEM Cell to Those Induced in a Free-Space Environment / C.L. Holloway, P. Fornberg // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2007. – Vol. 49, № 3. – P. 474–484.
122. Pouhe D. Mutual influence between the equipment under test and TEM cells / D. Pouhe // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2012. – Vol. 54, № 4. – P. 726–737.
123. Desideri D. Development and commissioning of a test system based on a TEM cell for RF exposure. / D. Desideri, A. Macshio // Brazilian Journal of Biomedical Engineering. – 2011. – Vol. 27, № 1. – P. 25–30.
124. Alotto P. Parametric analysis and optimization of the shape of the transitions of a two-port rectangular TEM cell. / P. Alotto, D. Desideri, A. Macshio // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC EUROPE), Sep. 2012. – P. 1–6.
125. Hilavin S. Design and implementation of a TEM stripline for EMC testing / S. Hilavin, A. Kustepeli // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2014. – Vol. 56, №1. – P. 23–27.
126. BS EN 55020:2007 Sound and television broadcast receivers and associated equipment — Immunity characteristics – Limits and methods of measurement, 2007.
127. IEC 61000-4-20. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides, 2003.
128. Paffi A. TEM cell system for vivo exposure at 2.45 GHz. / Paffi A., Liberti M., Fratta F., Merla C., Pinto R., Lovisolio G. A // 6th European Conf. on Antennas and Propag. (EUCAP). – 2012. – P. 1099–1101.
129. Shin D. An Experimental Investigation of Higher Order Mode Suppression in TEM Cells. / Shin D., Hubing T., Pommerenke D., Deng S. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2008. – Vol. 50, № 2. – P. 416–419.
130. Leat C. Targeted Resonance Control in a TEM Cell / Leat C., Walters A.J. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2008. – Vol. 50, № 2. – P. 252–258.
131. Leat C. Control of the TE Resonance in an Asymmetric TEM Cell / Leat C., Walters A.J. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2008. – Vol. 50, № 2. – P. 431–434.

132. Malaric K. TEM-cell with 75 Ω impedance for EMC measurements. / Malaric K., Bartolic J. // 1999 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. – 1999. – Vol. 1. – P. 234–238.
133. Malaric K. Design of a TEM-cell with increased usable test area / Malaric K., Bartolic J. // Turk. J. Engin. – 2003. – Vol. 11, № 2. – P. 143–154.
134. Crawford M.L. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements. / Crawford M.L., Workman J.L., Thomas C.G. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1978. – Vol. 20, № 3. – P. 368–375.
135. S.B. Cohn. Characteristic Impedance of the Shielded-Strip Transmission Line // Transactions of the IRE Professional Group on Microwave Theory and Techniques, Vol. 2, Iss. 2, 1954, P. 52–57.
136. M.Borsoero, G.Vizio, D.Parena, and V.Teppati. Synthetic TDR measurements for TEM and GTEM cell characterization. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no.2. April, 2007, P. 271–274.
137. C.M. Weil. The characteristic impedance of rectangular transmission lines with thin center conductor and air dielectric. IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, vol. 26, no. 4, pp. 238–242, Apr. 1978.
138. A.Nothofer, M.Alexander. The use of GTEM cells for EMC measurement. National Physical Laboratory, no 65 January, 2003, 53 p.
139. Комнатнов М.Е. Обзор TEM-камер, используемых при проведении испытаний на ЭМС. – Томск.: В-Спектр, Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2013», 2013. – С. 116–119.
140. Tesqom [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ctscorp-usa.com> (дата обращения 19.03.2014).
141. Xiang Z., Liaolan W., Long W., Minhua L. Differences in specifications of field uniformity for GTEM cell between the standard IEC 61000-4-3:2002 and IEC 61000-4-20:3003. CEEM'2006/Dalian. P.782–786
142. Sinha S., Stander T. Development, simulation and construction of cost-effective GTEM cells // 23rd International Conference Radioelektronika, Apr. 2013. – P. 39-44.
143. Yuanyuan W., Mengxia Y., Wensi Z., Junru Z. Design of ultra wide band transition connector for GTEM cell // 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), Sept. 2011. – P. 3657-3660.

144. Chakrabarty A., Sanyal S., Ghosh S. Effect of cross-polarization specification on the test volume of a GTEM cell // 8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, INCEMIC 2003, Dec. 2003. – P. 343-347.
145. Monich G., Pouhe D., Sandstede O. A system theoretical approach for investigating the performance of GTEM cell hybrid termination // 2013 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Sept. 2013. – P. 49-53.
146. Bartolic J., Malaric K. Distribution of currents on septum in GTEM-cell depending on the resistor position, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC '03 2003. – 2003. – Vol. 1. – P. 48-50.
147. Maier B., Pouhe D. Design and simulation of a mode suppressed GTEM cell, 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Sept. 2012. – P. 1159-1164.
148. Bahtina N., Poplavko Y.M., Shevchuk A.M., Prokopenko Y.V. Influence of absorber termination quality in the GTEM cell on the RF radiation measurement // 2005 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sept. 2005. – Vol. 2. – P. 766-767.
149. B. E. Roseberry, R. B. Schulz. A parallel-strip line for testing RF susceptibility. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, June 1965, Vol. 7, Issue 2, P. 142-150.
150. Yeon-choon Chung, Tae-Won Kang, Dong-Chul Park. Design and construction of stripline for measuring electromagnetic immunity of vehicular electrical cables. 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, May 1977, P. 9-12.
151. J. D. Gavenda, M. D. Foegelle. A strip-line TEM cell for measuring electromagnetic emissions. IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 1991, P. 17-18.
152. ISO 11452-5:2002, Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Part 5: Stripline.
153. M. Valek, T. Korinek, T. Bostik. Design of stripline for EMC testing, 14th. Conference on microwave techniques (COMITE), Apr. 2008, P. 1-4.
154. Y. Murata, T. Hoshina, Y. Hatori. Susceptibility of Notebook Computers to HPM, 2014 IEEE international symposium on electromagnetic compatibility (EMC), Aug. 2014, P. 549-553.
155. J. Catrysse, V. Filip, D. Pissort. Measuring and simulating EMI on very small components at high frequencies, 2013 international symposium on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE), Sept. 2013, P. 961-965.

156. J. Catrysse, V. Filip, D. Pissort, C. Brull. A new stripline measuring setup for the characterization of conductive gaskets up to 18 GHz, 2014 IEEE international symposium on electromagnetic compatibility (EMC), July 2010, P. 165-170.
157. Озеркин Д.В. Термостабилизация радиоэлектронной аппаратуры пикоспутников // Журнал "Колонизация космоса", 2013, Том 4, С. 1–15.
158. Dienot J.-M. Thermal-electromagnetic susceptibility behaviors of PWM patterns used in control electronic circuit. / Dienot J.-M., Batista E., Ramos I. // IEEE 10th Int. Workshop on the Electromagn. Compat. of Integrated Circuits (EMC Compo). – 2015. – P. 190–195.
159. ECSS-E-ST-20 (2008), Space engineering – Electric and electronic.
160. ECSS-E-ST-20-06 (2008), Space engineering – Spacecraft charging.
161. ГОСТ Р 51317-4-3:2006 Электромагнитная совместимость – Часть 4-3: Методы испытаний и измерений – Испытания на устойчивость к излученному радиочастотному электромагнитному полю.
162. Muccioli J.P. Predicting module level RF emissions from IC emissions measurements using a 1 GHz TEM or GTEM cell – a review of related published technical papers. / Muccioli J.P., North T.M., Slattery K.P. // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC) . – Aug. 2008. – P. 1–7.
163. Lin H.-N., Kuo C.-W., Cheh C.-K., Chen J.-S. Analysis of EMI effect on flash memory IC // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), May. 2012. – P. 757–760.
164. SAE J 1752/3:2011-06-17 Measurement of Radiated Emissions from Integrated Circuits TEM/Wideband TEM (GTEM) Cell Method; TEM Cell (150 kHz to 1 GHz), Wideband TEM Cell (150 kHz to 8 GHz)
165. Кудряшов В.Б. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей / В.Б. Кудряшов, В.С. Лапшов, В.П. Носков, И.В. Рубцов // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 42–57.
166. Войнов И.В. Робототехника в Миасском филиале Южно-Уральского государственного уни-верситета / И.В. Войнов, Б.А. Морозов // Всерос. науч.-практ. конф. «Развитие Арктики и приполярных регионов»: сб. матер. – Екатеринбург: УРФУ, 2014. – С. 57–66.
167. Фонарев Г.А. Электромагнитное поле Мирового океана и его использование для строения дна и водной оболочки: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.12. – М., 1982. – С. 348.

168. Доронин Ю.П. Электромагнитное поле океана / Ю.П. Доронин, И.А. Степанюк. – СПб.: Изд-во РГГМИ, 1992. – 87 с.
169. Березовский В.А. Сеть автоматической комбинированной СВ-КВ-УКВ-радиосвязи для мониторинга и передачи данных сухопутного и водного транспорта Крайнего Севера и Арктики / В.А. Березовский, В.В. Фомин, В.Л. Хазан // 2-я Всерос. науч.-техн. конф. «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана»: труды конф. – Новосибирск, 2013. – С. 232–237.
170. Дулькейт И.В. Перспективы использования средневолнового диапазона для информационного взаимодействия хозяйствующих субъектов в Арктике и обеспечения безопасности мореплавания в акватории Северного морского пути / И.В. Дулькейт, С.А. Завьялов, В.Л. Хазан // Всерос. науч.-практ. конф. «Развитие Арктики и приполярных регионов»: сб. матер. – Екатеринбург: УРФУ, 2014. – С. 181–184.
171. Иванов В.А. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов / В.А. Иванов, В.Ю. Кириллов, Е.П. Морозов. – М.: Изд-во. МАИ, 2012. – 168 с.
172. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов: дис. д-ра техн. наук. – М.: МИЭМ, 2009.
173. Kappenman J.G. Electric Power Grid Vulnerability to Natural and Intentional Geomagnetic Disturbances // J.G. Kappenman, W.A. Radasky, J.L. Gilbert // Proc. of the 16th Int. Zurich Symp. on EMC. – Zurich, Switzerland, 2005. – P. 447–450.
174. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники 4(34), часть 1 2014, Томск, 2014. С. 39–45.
175. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619615. TALGAT 2012 / Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Аширбакиев Р.И., Лежнин Ев.В., Лежнин Ег.В., Салов В.К., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Газизов Р.Р., Ахунов Р.Р. – Заявка №2013617773. Дата поступления 29 авг. 2013 г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 октября 2013 г.
176. Podgorski A.S. New concept of hybrid TEM-cell and reverberation chamber facility // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Aug. 2012. – P. 239–244.

177. Пат. WO 2006/045306 A1 США, МПК G01R 1/04, 31/28. An environmental test chamber / S. Lauritzen (US). – № 09/940399; заявл. 27.10.2004; выдан 04.05.2006.
178. Ticaud N., et al. Specific absorption rate assessment using simultaneous electric field and temperature measurements // IEEE Antennas and wireless propagation Letters 2012. V. 11. P. 252–255.
179. Schuderer J. et al. In vitro exposure systems for RF exposures at 900 MHz // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2004. V. 52. No. 8. pp. 2067–2075.
180. Z. Ji. et al. FDTD analysis of a gigahertz TEM cell for ultra-wideband pulse exposure studies of biological specimens // IEEE Trans. on Biomed. Eng. 2006. V. 53. No. 5. P. 780–789.
181. Baevsky R.M., Petrov V.M., Chernikova A.G. // Regulation of autonomic nervous system in space and magnetic storms // Adv. Space Res. 1998. V. 22. P. 227–234.
182. Майкельсон С.М. // Основы космической биологии и медицины в 3 томах. М.: Наука. 1975. 1074 с.
183. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате.
184. Васин А.Л., Труханов К.А. Оценка вклада широкополосного квазинепрерывного электромагнитного фона в дозовую нагрузку // Радиационная биология. Радиоэкология, 2003, Т. 43, №5, С. 590–593.
185. Труханов К.А. Некоторые вопросы электромагнитной и биоэлектромагнитной совместимости // Ежегодник Российского Национального Комитета по защите от неионизирующих излучений за 2005, С. 199–205.
186. De Pomerai D. et al. Microwave radiation induces a heat-shock response and enhances growth in the nematode *Caenorhabditis elegans* // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2000. V. 48. No. 11. P. 2076–2081.
187. Teodori L. et al. Exposure of cells to static magnetic field accelerates loss of integrity of plasma membrane during apoptosis // Cytometry, 2002. V. 49. No 3. P. 113–118.
188. Ganatra V. et al. Health Hazards Due to Electromagnetic Radiation in The Workplace // International Journal for Innovative Research in Science and Technology, 2015. V. 1. No. 8. P. 138–145.
189. Kwee S., Raskmark P. Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing radiation 1. ELF electromagnetic fields // Bioelectrochem. bioenerg. 1995. V. 36. No. 2. P. 109–114.
190. Kwee S., Raskmark P. Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing

- radiation 2. Microwave radiation // Bioelectrochem. bioenerg. 1998. V. 44. No. 2. P. 251–255.
191. Kwee S., Raskmark P., Velizarov S. Changes in cellular proteins due to environmental non-ionizing radiation. I. Heat-shock proteins // Electromagnetic Biology and Medicine. 2001. V. 20. No. 2. P. 141–152.
 192. Zhao W., Yang R. Experimental study on conformational changes of lysozyme in solution induced by pulsed electric field and thermal stresses // J. Phys.Chem. B. 2010. V. 114. No. 1. P. 503–510.
 193. Velizarov S., Raskmark P., Kwee S. The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal // Bioelectrochem. bioenerg. 1999. V. 48. No. 1. P. 177–180.
 194. Ardoino L. et al. A radio-frequency system for in vivo pilot experiments aimed at the studies on biological effects of electromagnetic fields //Physics in medicine and biology. 2005. V. 50. No. 15. P. 36–43.
 195. Lim H.B. et al. Effect of 900 MHz electromagnetic fields on nonthermal induction of heat-shock proteins in human leukocytes //Radiation research. 2005. V. 163. No. 1. P. 45–52.
 196. Schuderer J. et al. High peak SAR exposure unit with tight exposure and environmental control for in vitro experiments at 1800 MHz // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2004. V. 52. No. 8. pp. 2057-2066.
 197. Gatta L. et al. Effects of In Vivo Exposure to GSM-Modulated 900 MHz Radiation on Mouse Peripheral Lymphocytes. Radiation Res. 160(5):600-605. 2003.
 198. K.W. Linz, C. von Westphalen, J. Streckert, V. Hansen, R. Meyer. Membrane Potential and Currents of Isolated Heart Muscle Cells Exposed to Pulsed Radio Frequency Fields // Bioelectromagnetics 20:497-511 (1999).
 199. S. Kohler, R.P. O'Connor, T.D.T. Vu, P. Leveque and D. Arnaud-Cormos. Experimental Microdosimetry Techniques for Biological Cells Exposed to Nanosecond Pulsed Electric Fields Using Microfluorimetry // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. Vol. 61. No. 5. May 2013. P. 2015-2022.
 200. Merla C. et al. Real-time RF exposure setup based on a multiple electrode array (MEA) for electrophysiological recording of neuronal networks // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2011. V. 59. No. 3. pp. 755-762.
 201. Panagopoulos D.J., Karabarbounis A., Margaritis L.H. Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster* // Electromagn. Biol. Med. 2015. 23. (1). P. 29–43.

202. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования корпуса соединителя типа СНП // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2012. С. 154–157.
203. Busygina A.V., Komnatnov M.E., Matveyenko O.A. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects. Siberian scientific medical journal, 2016 № 1, V. 36, P. 48–54.
204. 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., Аширбакиев Р.И., Лежнин Ег.В., Салов В.К., Лежнин Ев.В., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е. Заявка №2012618426. Дата поступления 5 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2012 г.
205. Комнатнов М.Е. Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Доклады ТУСУРа. – 2011. – №2(24), ч. 1. С. 133–136.
206. Комнатнов М.Е., Рубченков Р.В., Иванов А.А. Эффективность экранирования металлическим корпусом с апертурами. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016, [принято к печати].
207. 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.
208. 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.
209. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
210. 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.
211. 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», г. Железногорск, 2011. С. 396–398.
 212. Комнатнов М.Е. Сравнение производительности математических библиотек при использовании различных типов данных / М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2011», Томск, 2011. С. 127–129.
 213. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Дементьев А.С. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей // Известия вузов. Физика. – 2012. – №9/2(55). – С. 89–92.
 214. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования корпуса радиотракта на плате бортовой аппаратуры космического аппарата. – Томск.: В-Спектр, Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2012», 2012. – С. 94–96.
 215. Белоусов А.О., Комнатнов М.Е., Суровцев Р.С. Оценка перекрестных наводок в многопроводном межсоединении печатной платы системы автономной навигации. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015», Томск, 2015. С. 163–165
 216. Джанбаев К.Э., Комнатнов М.Е., Суровцев Р.С. Моделирование дифференциальной пары на печатной плате системы автономной навигации. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015», Томск, 2015. С. 181–183
 217. Зырянова Н.А., Комнатнов М.Е., Суровцев Р.С. Анализ влияния сопротивления нагрузок на временной отклик связанных линий печатной платы системы автономной навигации. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015», Томск, 2015. С. 157–160.
 218. 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.
 219. М. Komnatnov, Т. Gazizov, А. Melkozerov. Optimization of the TEM-cell for a new type of

- climatic chamber. Proc. of IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications. August 11–14, 2015, Ottawa, Canada. P. 1–4.
220. Заявка № 2015156668 РФ. ТЕМ-камера / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов; заявл. 28.12.2015.
 221. 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.
 222. Балахнина Я.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Измерение температуры объекта под воздействием электромагнитного поля в ТЕМ-камере. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016, [принято к печати].
 223. Комнатнов М.Е. Обоснование целесообразности проведения совместного испытания на электромагнитные и температурные воздействия бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: сборник трудов VI ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос». – СПб.: БГТУ, 2014. – С. 46–48.
 224. Почуев М.И., Комнатнов М.Е. Предварительный анализ причин аномальной работы автогенератора Пирса. Сборник тез. докл. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС», г. Железногорск, 2014. С. 90–92
 225. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Temperature Controller for External Surface of Waveguide // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), May 2016, Moscow, Russian Federation. [Accepted.]
 226. Собко А.А., Комнатнов М.Е. Терморегулятор для климатической экранированной камеры. Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции (25–27 ноября 2015 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. С. 59–62.
 227. Осинцев А.В., Комнатнов М.Е., Собко А.А., Демаков А.В. Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2016)., (Рязань). – 2016, [принято к печати].
 228. Собко А.А., Комнатнов М.Е., Демаков А.В., Осинцев А.В. Н-мост на мощных полевых транзисторах, управляемый одним ШИМ-сигналом. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2016)., (Рязань). – 2016, [принято к печати].

229. Комнатнов М.Е., Собко А.А., Осинцев А.В. Плата управления терморегулятором климатической экранированной ТЕМ-камеры. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016, [принято к печати].
230. Комнатнов М.Е., Осинцев А.В., Собко А.А. Модуль связи климатической экранированной ТЕМ-камеры. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016, [принято к печати].
231. Комнатнов М.Е., Осинцев А.В., Собко А.А. Обзор операционных систем реального времени. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016, [принято к печати].
232. Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Программное обеспечение терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры. Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции (25–27 ноября 2015 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. С. 55–59.
233. Каргаполова Н.В., Комнатнов М.Е. Портативный датчик напряженности электрического поля. Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции (25–27 ноября 2015 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. С. 25–30.
234. Газизов Т.Р. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости. / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Комнатнов М.Е., и др. // Техника радиосвязи. – 2014. – №2(22). – С. 11–22
235. Патент на изобретение №2558706. Климатическая экранированная камера. Заявка №2014103639. Авторы: Комнатнов М.Е, Газизов Т.Р. Дата поступления 03 февраля 2014 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 08 июля 2015 г.
236. 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 Ensurance and simulation of electromagnetic compatibility: recent results in TUSUR University. International Conference on Applied Physics, Simulation and Computers, Austria, Vienna, 15–17 March 2015.
237. 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

238. Busygina A.V. Problems of Investigations in Sphere of Electromagnetic Fields Impact on Biological Objects / Busygina A.V., Komnatnov M.E., Matveyenko O.A.// IEEE 2015 Int. Conf. Biomed. Eng. Comput. Tech. SIBIRCON – 2015. Russia, Novosibirsk – P. 134–138.
239. Бебякина Е.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-ячейке. Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции (25–27 ноября 2015 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. С. 9–13.
240. Komnatnov M.E., Busygina A.V. Module for Visual Control of in vitro Results of the Joint Impact of Climatic and Electromagnetic Factors on Living Tissue // IEEE 16th Int. Conf. Micro/Nanotech. Electron. Devices EDM 2015, Erlagol (Russia, Altai), 2015. – P. 576–579
241. Заявка № 2015141200 РФ. Стол для электромагнитных исследований биологических объектов / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.В. Бусыгина; заявл. 28.09.2015.
242. Бебякина Е.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-камере. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016, [принято к печати].
243. Заявка № 2015141198 РФ. Камера для совместных климатических и электромагнитных воздействий на биологический объект / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.В. Бусыгина, А.А. Собко, А.В. Осинцев, О.А. Матвеев; заявл. 28.09.2015.
244. Комнатнов М.Е., Бусыгина А.В. Устройство для визуального контроля результатов совместного влияния климатических и электромагнитных факторов на живые ткани. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015», Томск, 2015. С. 168–171.
245. Конюхов А.Л., Комнатнов М.Е. Создание панорам изображений трасс обзора в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013», Томск, 2013. С. 122–125
246. Komnatnov M.E. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing. / Komnatnov M.E., Gazizov T.R. // IEEE MTT-S Intern. Microw. Workshop Series on RF and Wireless Techn. Biomed. Health. Applic. IMWS-BIO. – 2014. England, London. – P. 1–4.

247. Матвеев О.А., Комнатнов М.Е. Разработка методологических подходов к изучению совместного влияния электромагнитных и климатических факторов на биологические объекты. Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции (25–27 ноября 2015 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. С. 42–47.
248. Демаков А.В. Методика проектирования GTEM-камеры. / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев // Материалы международной научно-технической и научно-методической конференции "Современные технологии в науке и образовании", Рязань, 2016. [принято к печати]
249. Сагалаков Е.В., Комнатнов М.Е. Электродинамическое моделирование полосковой линии для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость. Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2015», Томск, 2015. С. 136–138.
250. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617550. TALGAT 2014. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., и др. Заявка №2015614488. Дата поступления 27 мая 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 июля 2015 г.
251. CARPENTER Нуми 800 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=103&e=204&c=TechArt> (дата обращения 13.07.2015).
252. Natl. Bur. Stand. (U.S.), Small Aperture Analysis of the Dual TEM Cell and an Investigation of Test Object Scattering in a Single TEM cell. Tech. Note 1076, Oct., 1984, 60 p.
253. TEM CELL [Электронный ресурс]. URL: http://www.fischercc.com/productfiles/TEM%20Cell%20Rev%20B_1f6a.pdf (дата обращения 3.06.2014).
254. ГОСТ 28199–89. Основные методы испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание А: Холод.
255. ГОСТ 28200–89. Основные методы испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание В: Сухое тепло.
256. ГОСТ 28201–89. Основные методы испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Са: Влажное тепло постоянный режим.
257. ГОСТ 50414-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. Классы, основные параметры, технические

требования и методы испытаний.

258. AIAA S-121-2009 Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems.
259. Atmel [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atmel.com> (дата обращения 10.01.2016).
260. RF Absorber ACCUSER [Электронный ресурс]. <http://www.ets-lindgren.com/RFAbsorbers> (дата обращения 5.10.2014).

Приложение



УТВЕРЖДАЮ
Директор НИИ ПММ ТГУ,
д.ф.-м.н., профессор
А.А. Глазунов
« 08 » ноября 2015 г.

АКТ
о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Комнатнова Максима Евгеньевича

Комиссия в составе:

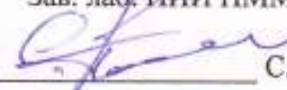
зав. лаб. НИИ ПММ ТГУ, д.ф.-м.н. С.В. Пономарёва,
учёного секретаря НИИ ПММ ТГУ, к.ф.-м.н. И.В. Ерёмину

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в ОАО «ИСС» следующих результатов диссертационной работы Комнатнова М.Е.:

1. Оценки эффективности экранирования (ЭЭ) электрического, магнитного и электромагнитного полей в диапазоне частот от 10 кГц до 18 ГГц пластинами алюминия и сплава магния МА2-1, блока радиотехнического 1200 бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА).
2. Результаты вычисления ЭЭ для семи разных размеров унифицированных электронных модулей (УЭМ).
3. Результаты вычисления ЭЭ корпуса соединителя типа СНП.
4. Методика повышения ЭЭ корпуса соединителя типа СНП при помощи перекрытия щели.
5. Результаты вычисления резонансных частот корпуса радиотракта, используемого в блоке радиотехническом 1200 БА КА.
6. Результаты вычисления диаграмм направленности и распределения токов для печатной платы блока радиотехнического 1200 БА КА.

Указанные результаты представлены в технических отчётах по опытно-конструкторской работе «Разработка комплекса программных и технических средств проектирования, изготовления и испытаний унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов (КА) связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования» НИ ТГУ для ОАО «ИСС» в рамках реализации Постановления №218 Правительства РФ, тема «УЭМ», хоздоговор №2148 от 05.07.2010. В 2010–2012 гг. Комнатнов М.Е. являлся исполнителем трех этапов этой работы.

Зав. лаб. НИИ ПММ ТГУ д.ф.-м.н.

 С.В. Пономарёв

Учёный секретарь НИИ ПММ ТГУ, к.ф.-м.н.

 И.В. Ерёмин



Акционерное общество
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени академика М.Ф. Решетнёва»



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора по
электрическому проектированию и системам
управления КА акционерного общества
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»
(АО «ИСС»), председатель секции №2 НТС,
к.т.н., доцент



С.Г. Кочура

«__» _____ 2015

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Комнатнова Максима Евгеньевича

Комиссия в составе:

главного конструктора проектирования и испытаний РЭА ОАО «ИСС» В.Н. Школьного,
начальника отдела конструирования бортовой РЭА ОАО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова,
начальника группы ОАО «ИСС», к.ф.-м.н. А.А. Хвалько

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в ОАО «ИСС»
следующих результатов диссертационной работы Комнатнова М.Е.:

1. Сравнительный анализ эффективности экранирования (ЭЭ) металлического основания
печатных плат и крышки корпуса из алюминия и сплава магния МА2-1 для корпуса блока
системы автономной навигации (САН) бортовой аппаратуры космического аппарата.

2. Анализ ЭЭ корпуса радиотракта, плат цифровой обработки и источника питания, а
также корпуса блока САН в целом.

3. Распределения электрического поля и поверхностных токов, которые позволяют
локализовать места их максимальных значений для выявления мест наиболее эффективного
проникновения электромагнитных помех внутрь корпуса САН.

Указанные результаты представлены в технических отчетах по опытно-конструкторской
работе «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с
применением отечественной специализированной элементной базы на основе
наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов» ТУСУРа для
АО «ИСС» в рамках реализации Постановления №218 Правительства РФ, тема «САН»,
хоздоговор 96/12 от 16.11.2012. В 2013-2015 гг. Комнатнов М.Е. являлся соисполнителем этапов
этой работы.

Главный конструктор проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС»



В.Н. Школьный

Начальник отдела конструирования бортовой РЭА АО «ИСС», к.т.н.



С.Б. Сунцов

Начальник группы ОАО «ИСС», к.ф.-м.н.



А.А. Хвалько

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе НИ ТГУ

В.В. Дёмин

2015 г.

**АКТ**

о внедрении (использовании) в учебный процесс результатов
диссертационной работы
Комнатнова Максима Евгеньевича

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» результатов диссертационной работы Комнатнова М.Е.:

1. Оценки эффективности экранирования (ЭЭ) электрического, магнитного и электромагнитного полей в диапазоне частот от 10 кГц до 18 ГГц пластинами алюминия и сплава магния МА2-1, блока радиотехнического 1200 бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА).

2. Результаты вычисления ЭЭ для разных размеров унифицированных электронных модулей (УЭМ).

3. Результаты вычисления и методика повышения ЭЭ корпуса соединителя типа СНП при помощи перекрытия щели.

4. Анализ ЭЭ корпуса радиотракта, плат цифровой обработки и источника питания, а также корпуса блока системы автономной навигации (САН) в целом.

5. Распределения электрического поля и поверхностных токов, которые позволяют локализовать места их максимальных значений для выявления мест наиболее эффективного проникновения электромагнитных помех внутрь корпуса САН.

6. Устройство и принцип работы TEM-/GTEM-камер для проведения испытаний на помехоэмиссии и помехоустойчивость, а также измерения ЭЭ корпусов радиоэлектронных средств в области электромагнитной совместимости.

Полученные результаты использованы в учебном процессе по дисциплинам «Электромагнитная совместимость», «Основы надежности и технической диагностики электронных систем», «Космическое приборостроение» в весеннем семестре с 2014/2015 учебного года для магистрантов физико-технического факультета по программе «Проектирование и конструирование промышленных космических систем» реализуемой совместно с предприятием «Газпром космические системы».

Декан ФТФ ТГУ

Шрагер Э.Р.

Директор департамента
образования ТУСУР

Троян П.Е.
17.03.2016 г.

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Комнатнова Максима Евгеньевича

Полученные результаты использованы для проведения практических и лабораторных работ по дисциплинам: «Устройство генерирования и формирование сигналов»; «Теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем»; «Электромагнитная совместимость и управление радиочастотным спектром»; «Безопасность и электромагнитная совместимость»; «Защита бытовой радиоэлектронной аппаратуры», а также в групповом проектном обучении по проекту ТУ-1503 "Разработка устройства для испытания на ЭМС" и восьми выпускных квалификационных работ 2014–2015 гг, руководителем которых являлся Комнатнов М.Е.

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе  /А.Н. Булдаков



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по НИИ ТУСУРа
д.т.н., проф. Мещеряков Р.В.
«20» 01 2015 г.

АКТ внедрения №1/2015 от 20.01.2015

Настоящим актом подтверждается факт внедрения (использования) на этапе 4 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, выполняемой в ТУСУРе для ОАО «ИСС» в ходе реализации Постановления 218 Правительства РФ, следующих результатов интеллектуальной деятельности:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617440. SEbox. 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.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617441. Квазистатический анализ плоского трехпроводного кабеля. Орлов П.Е., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. – Заявка №2014615105. Дата поступления 29 мая 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 июля 2014 г.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660639. MicrostripNcond. Салов В.К., Суровцев Р.С., Газизов Т.Р. – Заявка №2014615106. Дата поступления 29 мая 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 октября 2014 г.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661020. ConnectorDB9Reponse. Салов В.К., Суровцев Р.С., Газизов Т.Р. – Заявка №2014615113. Дата поступления 29 мая 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 октября 2014 г.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661617. ConnectorSNP393Parameters. Суровцев Р.С., Газизов Т.Р. – Заявка №2014619248. Дата поступления 15 сентября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10 ноября 2014 г.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661022. SEplate. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Куксенко С.П. – Заявка №2014615110. Дата поступления 29 мая 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 октября 2014 г.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661507. Квазистатический анализ многослойной печатной платы. Орлов П.Е., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. – Заявка №2014619241. Дата поступления 15 сентября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 октября 2014 г.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661619. Электромагнитная наводка посадочного места корпуса KD-V99D59-A/ Калимулин И.Ф., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. – Заявка №2014619243. Дата поступления 15 сентября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 октября 2014 г.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661509. Емкостная матрица тестовой 3D-структуры. Калимулин И.Ф., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. – Заявка №2014619245. Дата поступления 15 сентября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 октября 2014 г.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661616. Quasi-static simulation of TEM/GTEM-cells. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. – 2014619247. Дата поступления 15 сентября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10 ноября 2014 г.

Указанные программы использовались для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости цепей электрических принципиальных схем, элементов печатных плат и конструкции блока системы автономной навигации. Результаты внедрения (использования) представлены в технических отчётах по теме «САН».

Руководитель темы «САН»

директор НИИ космических технологий ТУСУРа
д.т.н. Ю.А. Шиняков



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НРИИ

д.т.н., проф. Мещеряков Р.В.

18.12.2015

АКТ внедрения №2/2015 от 18.12.2015

Настоящим актом подтверждается факт внедрения (использования) в ОКР по теме «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012, выполняемой в ходе реализации Постановления 218 Правительства РФ, следующих результатов интеллектуальной деятельности:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015611088. PCBsensor. Орлов П.Е., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. – Заявка №2014661973. Дата поступления 25 ноября 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23 января 2015 г.
2. 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., Газизов Р.Р., Лежнин Ев.В., Салов В.К., Лежнин Ег.В., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Ахунов Р.Р., Новикова Е.А. Заявка №2015611288. Дата поступления 3 марта 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2015 г.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615835. ILU(0)-разложение матрицы, хранимой в разреженном строчном формате, с последовательным перебором элементов. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612781. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616205. ILU(0)-разложение матрицы, хранимой в модифицированном разреженном строчном формате. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612783. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 июня 2015 г.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616124. ILU(0)-разложение матрицы, хранимой в модифицированном разреженном строчном формате, с использованием вспомогательного вектора. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612895. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 июня 2015 г.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615730. Организация хранения плотной матрицы в модифицированном строчном разреженном формате после предфильтрации, основанной на максимальном элементе матрицы. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612891. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 мая 2015 г.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615837. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с использованием переформирования матрицы предобуславливания по заданному порогу числа итераций. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов

- Т.Р. Заявка №2015612782. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615729. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с переформированием матрицы предобуславливания при превышении среднего времени решения одной системы. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612890. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 мая 2015 г.
 9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615793. Многократное решение систем линейных алгебраических уравнений. Авторы: Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612566. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 мая 2015 г.
 10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615987. Вычисление дифференциальной ёмкости, индуктивности и сопротивления для связанных обращено-подвешенных полосковых линий. Авторы: Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Калимулин И.Ф. Заявка №2015612593. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28 мая 2015 г.
 11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616060. Вычисление дифференциальной ёмкости, индуктивности и сопротивления для связанных подвешенных полосковых линий. Авторы: Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Калимулин И.Ф. Заявка №2015612715. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2015 г.
 12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615988. Многорезонансная модель индуктивности Murata LQW2BHN33NJ03 для диапазона частот 0,01–40 ГГц. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612601. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2015 г.
 13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616087. Многорезонансная модель конденсатора Murata GRM21BR71H224K для диапазона частот 0,01–40 ГГц. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612625. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2015 г.
 14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615845. Модель LC-фильтра на базе компонентов Murata GRM21BR71H224K и LQW2BHN33NJ03 для диапазона частот 0,01–40 ГГц. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612624. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.
 15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615589. Оптимизация параметров измерительных плат набора TRL Calkit for UTF3680 с учётом технологии производства. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612554. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 мая 2015 г.
 16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615880. Вычисление напряжений и токов вдоль двухпроводной линии

- передачи на основе квазистатического анализа / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий – Заявка №2015612556. Дата поступления 2 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615794. Вычисление временного отклика модального фильтра с лицевой связью / А.М. Заболоцкий, А.Т. Газизов, Т.Р. Газизов – Заявка №2015612568. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 мая 2015 г.
 18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616321. Решение СЛАУ с матрицей, полученной с помощью $ILU(0)$ -разложения и хранимой в модифицированном разреженном строчном формате. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612893. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05 июня 2015 г.
 19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616320. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с использованием матрицы предобуславливания, полученной при решении первой системы. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612892. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05 июня 2015 г.
 20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616322. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с использованием при решении текущей системы вектора решения предыдущей. Авторы: Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612894. Дата поступления 09 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05 июня 2015 г.
 21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617207. Временной отклик последовательного интерфейса процессора. Авторы: Зырянова Н.А., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Заявка №2015614262. Дата поступления 22 мая 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 июля 2015 г.
 22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617542. Вычисление дифференциальной ёмкости, индуктивности и сопротивления для связанных обращенных полосковых линий. Авторы: Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Калимулин И.Ф. Заявка №2015612552. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 июля 2015 г.
 23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618664. Вычисление комплексной емкостной матрицы многопроводной микрополосковой линии на подложке из FR-4 в диапазоне частот с помощью блочного LU-разложения. Авторы: Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Заявка №2015612938. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 августа 2015 г.
 24. 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., Газизов Р.Р., Лежнин Ев.В., Салов В.К., Лежнин Ег.В., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Ахунов Р.Р., Новикова Е.А., Газизов Руст.Р., Веселовский А.В.

- Заявка №2015614488. Дата поступления 27 мая 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 июля 2015 г.
25. 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., Газизов Русл.Р., Лежнин Ев.В., Салов В.К., Лежнин Ег.В., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Ахунов Р.Р., Газизов Руст.Р., Веселовский А.В. Заявка №2015617580. Дата поступления 17 августа 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1 октября 2015 г.
 26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615988. Многорезонансная модель индуктивности Murata LQW2BHN33NJ03 для диапазона частот 0,01–40 ГГц. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612601. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2015 г.
 27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616087. Многорезонансная модель конденсатора Murata GRM21BR71H224K для диапазона частот 0,01–40 ГГц. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612625. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2015 г.
 28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615845. Модель LC-фильтра на базе компонентов Murata GRM21BR71H224K и LQW2BHN33NJ03 для диапазона частот 0,01–40 ГГц. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612624. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.
 29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615589. Оптимизация параметров измерительных плат набора TRL Calkit for UTF3680 с учётом технологии производства. Авторы: Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612554. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 мая 2015 г.
 30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615880. Вычисление напряжений и токов вдоль двухпроводной линии передачи на основе квазистатического анализа / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий – Заявка №2015612556. Дата поступления 2 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.
 31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617207. Временной отклик последовательного интерфейса процессора. Авторы: Зырянова Н.А., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Заявка №2015614262. Дата поступления 22 мая 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 июля 2015 г.

Указанные программы использовались для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости цепей электрических принципиальных схем, элементов печатных плат и конструкции блока системы автономной навигации космического аппарата. Результаты внедрения (использования) представлены в технических отчетах по теме «САН».

Руководитель темы «САН»

директор НИИ космических

технологий ТУСУРа

д.т.н. Ю.А. Шиняков



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2558706

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ЭКРАНИРОВАННАЯ КАМЕРА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2014103639

Приоритет изобретения 03 февраля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 08 июля 2015 г.

Срок действия патента истекает 03 февраля 2034 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012660373

TALGAT 2011

Правообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью
«ТУСУР – Модальные Технологии» (RU)*

Автор(ы): *Газизов Тальгат Рашитович, Мелкозеров Александр
Олегович, Газизов Тимур Тальгатович, Куксенко Сергей
Петрович, Заболоцкий Александр Михайлович, Аширбакиев
Ренат Ихсанович, Лежнин Евгений Владимирович, Салов
Василий Константинович, Лежнин Егор Владимирович, Орлов
Павел Евгеньевич, Калимулин Илья Фидайлович, Суровцев
Роман Сергеевич, Комнатнов Максим Евгеньевич (RU)*



Заявка № 2012618426

Дата поступления 5 октября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 ноября 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013619615

TALGAT 2012

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«ТУСУР - Модальные Технологии» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



Заявка № **2013617773**

Дата поступления **29 августа 2013 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 октября 2013 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614365

TALGAT 2013

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью «ТАЛГАТ» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



Заявка № **2015611288**

Дата поступления **03 марта 2015 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 апреля 2015 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015617550

TALGAT 2014

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Твердь» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



Заявка № 2015614488

Дата поступления 27 мая 2015 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 14 июля 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015660487

TALGAT 2015

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Твердь» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



Заявка № 2015617580

Дата поступления 17 августа 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014661616

Quasi-static simulation of TEM/GTEM-cells

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (РУ)*

Авторы: *Комнатнов Максим Евгеньевич (РУ),
Газизов Тальгат Рашитович (РУ)*



Заявка № **2014619247**

Дата поступления **15 сентября 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **10 ноября 2014 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014617440

SEbox

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (РУ)**

Авторы: **Комнатнов Максим Евгеньевич (РУ), Газизов Тальгат Рашитович (РУ), Куксенко Сергей Петрович (РУ)**

Заявка № 2014615102

Дата поступления 29 мая 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 июля 2014 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014661022

SEplate

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)**

Авторы: **Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU)**



Заявка № 2014615110

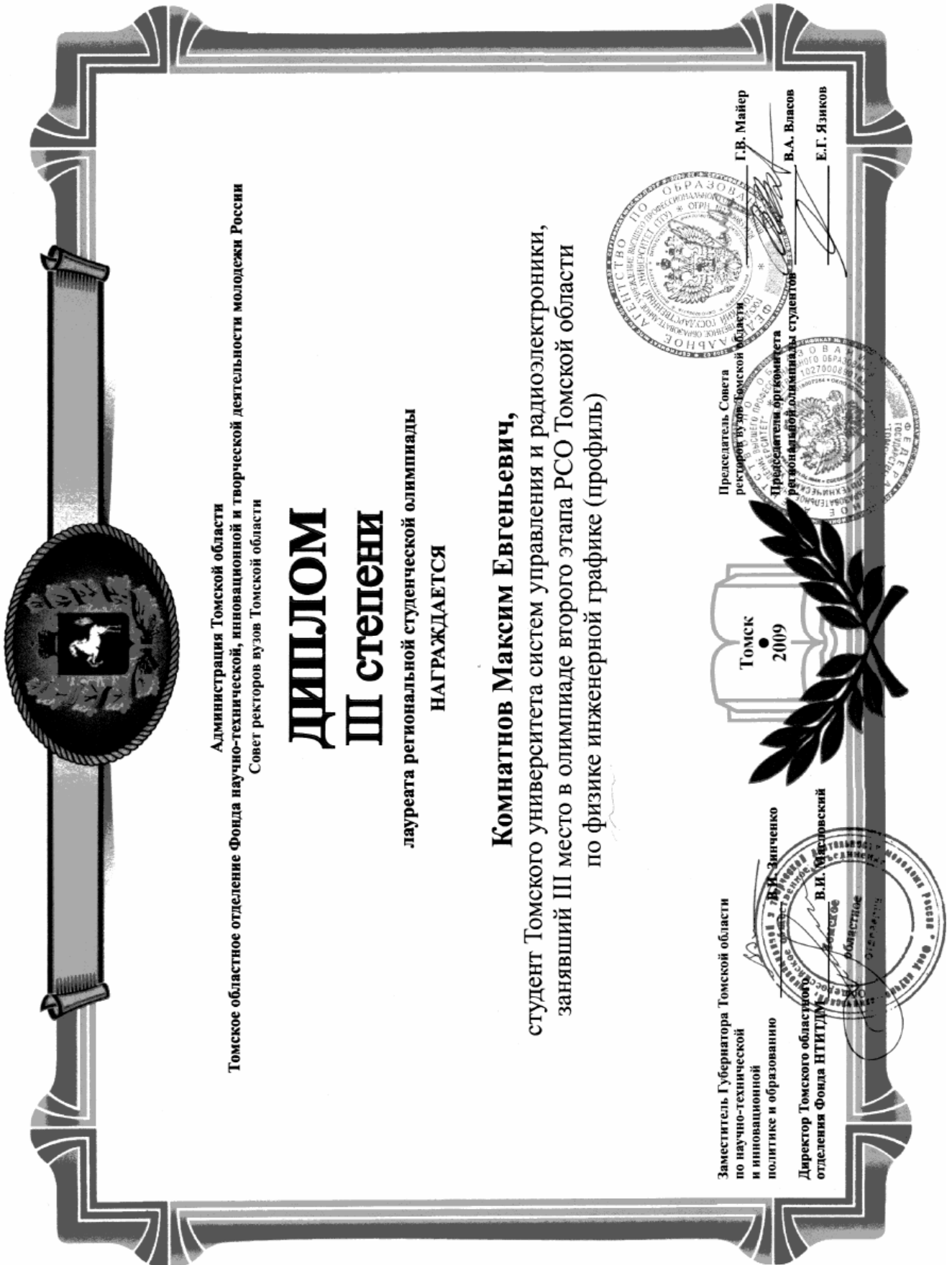
Дата поступления 29 мая 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 октября 2014 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий







ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО ФОНДА
(ГОСУДАРСТВЕННОГО)
СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ МАЛЫХ
ФОРМ ПРЕДПРИЯТИЙ В НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКОЙ СФЕРЕ ПО
ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ



АДМИНИСТРАЦИЯ ГОРОДА
ТОМСКА
КОМИТЕТ ПО РАЗВИТИЮ
ИННОВАЦИЙ И
ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА

ГРАМОТА

Награждается

Комнатнов Максим Евгеньевич

за лучший проект в области технологии создания
ракетно-космической и транспортной техники
нового поколения

“Климатическая экранированная ТЕМ-камера”,
представленный в рамках
Открытой выставки научных достижений
молодых учёных «РОСТ.up!»
(7-8 ноября 2013 г.)

Представитель Фонда по
Томской области,
председатель комитета по развитию
инноваций и предпринимательства

Г.Н. Казьмин



ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Свидетельство

КОМНАШНОВ МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

аспирант кафедры ТУ,

за высокие достижения в научно-исследовательской деятельности
включен в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРА

Ректор

Ю.А. Шурыгин

Проректор по НР

А.А. Шелупанов



1 ноября 2013 г.

Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

Грамота

III премия

Лучший доклад на секции
«Ракетно-космическая и авиационная техника»

Общероссийской молодежной
научно-технической конференции
«Молодежь. Техника. Космос»

НАГРАЖДАЕТСЯ

Комнатных

Максим Евгеньевич

Тамский государственный университет СУР

Балтийский государственный технический университет

«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

19-21.03.2014г.

Ректор

БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова






Свидетельство

участия

Комнатнова Максима Евгеньевича, аспиранта 1 года обучения, младшего научного сотрудника каф. Ту

с проектом

«Климатическая экранированная ТЕМ-камера»

Проректор по научной работе ТУСУР

А.А. Шелупанов

РОСТУР

Открытая
выставка
научных
достижений
молодых
ученых
ТУСУРа
2013

Томск, ТУСУР, 7-8 ноября 2013



ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ

малых форм предприятий в научно-технической сфере

ДИПЛОМ

Победитель программы “Участник молодежного
научно-инновационного конкурса” (“УМНИК”)

Каишатнов

Максим Евгеньевич

Председатель
Наблюдательного совета

И.М. Бортник

Генеральный директор
Фонда содействия развитию
малых форм предприятий
в научно-технической сфере

С.Г. Поляков



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»

ДИПЛОМ

Выдан

(с вручением памятного знака)

Комнатнову Максиму Евгеньевичу

(ТУСУР, Научно-исследовательская лаборатория
«Безопасность и электромагнитная совместимость
радиоэлектронных средств»)

за лучшую разработку

«Климатическая экранированная ТЕМ-камера»,

представленную

**НА ТРЕТЬЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ ВЫСТАВКЕ
«РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. РиЭ – 2014»**



Председатель Оргкомитета,
Директор ЦКП
«Центр радиоизмерений ТГУ»
В.И.Сусяев

В.И.Сусяев

г. Томск

10-11 октября 2014 г.





**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДИПЛОМ

I степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

М.Е. Комнатнов, А.В. Бусыгина

аспирант каф. ТУ, ассистент каф. ТУ

за лучший доклад на секции 3 «Аудиовизуальная техника, бытовая
радиоэлектронная аппаратура и сервис»

Всероссийской научно-технической конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР - 2015»



Ректор
д.т.н., профессор

А.А. Шелупанов

Томск – 2015





СЕРТИФИКАТ

НАСТОЯЩИМ УДОСТОВЕРЯЕТСЯ, ЧТО

Комнатнов Максим Евгеньевич

В ПЕРИОД С 29 СЕНТЯБРЯ ПО 2 ОКТЯБРЯ 2015 ГОДА ПРИНЯЛ(А) УЧАСТИЕ В РАБОТЕ
МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ФОРУМА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАУКА БУДУЩЕГО – НАУКА МОЛОДЫХ»

Ладный Александр Олегович

Заместитель директора Департамента науки и технологий
Министерства образования и науки
Российской Федерации



Национальный исследовательский Томский государственный университет
 Российский фонд фундаментальных исследований
 Радиофизический факультет ТГУ
 Лаборатория терагерцовых исследований ТГУ
 ЦКП «Центр радиофизических измерений, диагностики
 и исследования параметров природных и искусственных материалов» ТГУ



ДИПЛОМ

Четвёртой Международной выставки
 «Радиофизика и электроника»
 выдан

(с вручением памятного знака)

Осинцеву Артему Викторовичу

и

Комнатнову Максиму Евгеньевичу

(Томский государственный университет систем
 управления и радиоэлектроники)

за лучшую разработку

«Управление роботом в сложной среде»

Председатель Программного комитета,
 проректор по учебной работе ТГУ

г.Томск
 6-10 октября
 2015 г.



В.В. Дёмин



ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ



ДИПЛОМ

III степени
НАГРАЖДАЕТСЯ

А.А. Собоко, М.Е. Комнатнов

за лучший доклад на секции 12 «Электромагнитная совместимость
радиоэлектронной аппаратуры» XI Международной научно-практической
конференции «Электропные средства и системы управления»

Ректор ТУСУР
д.т.н., профессор



Томск – 2015