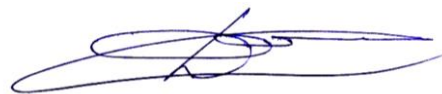


На правах рукописи



Демаков Александр Витальевич

**Совершенствование камер для испытаний
на электромагнитную совместимость**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск– 2019

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

Научный руководитель: Газизов Тальгат Рашитович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Минкин Марк Абрамович, доктор технических наук, профессор, АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем»

Муравьев Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится 27 декабря 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/asd36c21> и в библиотеке ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «__» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение устойчивой работы радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения в условиях внешних электромагнитных воздействий является ключевой задачей их проектирования. Данное требование актуально в связи с неуклонным ростом частот полезных сигналов, интеграцией элементной базы, ростом плотности монтажа печатных плат (ПП) и снижением уровней питающих напряжений. Использование полупроводниковых компонентов и интегральных схем (ИС) позволяет увеличить производительность, а также снизить массогабаритные показатели РЭС, при этом увеличивая их восприимчивость к электромагнитному полю (ЭМП). В этой связи к современным РЭС предъявляются все более жесткие требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). С помощью ТЕМ-камер выполняются измерения помехоэмиссии и испытания на помехоустойчивость полупроводниковых компонентов, узлов и блоков РЭС, что позволяет оценить их паразитное излучение и возможность функционирования при воздействии ЭМП. Значительный вклад в исследования ТЕМ-камер внесли Е.А. Рахаева, M.L. Crawford, С.М. Weil, К. Malaric, A. Paffi и др. Частоты сигналов современных ИС могут достигать значений 5–6 ГГц, что превышает диапазон частот стандартизированных испытаний и требует совершенствования ТЕМ-камер для возможности проведения актуальных исследований ИС. Для защиты блоков и узлов РЭС от излучаемых электромагнитных помех применяется электромагнитное экранирование. В качестве материалов для изготовления экранов применяются металлы и их сплавы, которые в последние годы постепенно заменяются полимерными композитами, обладающими широким диапазоном частот поглощения и малой по сравнению с металлом массой. В частности, актуально применение композитных материалов в составе корпусов ИС для снижения их помехоэмиссии. Значительный вклад в исследование и разработку устройств измерения экранирующих свойств композитных материалов внесли P.F. Wilson, M.S. Sarto, M. Badic и A. Tamburrano. Стандартизированные измерения композитных материалов проводятся на частотах до 1,5 ГГц, что требует совершенствования методов и устройств для проведения измерений экранирующих свойств композитных экранирующих материалов в широком диапазоне частот. Испытания крупногабаритных РЭС на ЭМС являются дорогостоящими, поскольку требуют сложной измерительной оснастки (антенн, усилителей мощности, генераторов, анализаторов спектра и т.д.), а также специального помещения (безэховая камера, испытательный полигон). Потребность в дешевых испытательных установках, обеспечивающих повторяемость получаемых результатов, приводит к поиску альтернативных устройств испытаний, одним из которых является электромагнитная реверберационная камера (РК). Значительный вклад в исследования аспектов работы, методов проектирования и совершенствования конструкций РК внесли R. Serra, A.C. Marvin, F. Moglie, V.M. Primiani, A. Cozza, L.R. Arnaut, Y. Huang, M.O. Hatfield и др. Однако в научной литературе рассмотрено мало подходов, позволяющих выполнить

приближенную и быструю оценку распределения ЭМП на заданных частотах, что требуется на предварительном этапе разработки РК.

Цель работы – усовершенствовать камеры для испытаний радиоэлектронных средств на ЭМС. Для её достижения требуется решение следующих задач: разработать усовершенствованную ТЕМ-камеру, пригодную для проведения испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС; разработать усовершенствованную коаксиальную камеру, пригодную для измерения эффективности экранирования образцов планарных композитных материалов; разработать и программно реализовать математическую модель для приближенной оценки распределения амплитуд напряженности электрического поля в эффективной рабочей зоне под испытываемый объект реверберационной камеры.

Научная новизна

1. Разработана и создана ТЕМ-камера для оценки уровня помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем, отличающаяся оптимизированной формой согласующих переходов, обеспечивающей требуемое стандартами испытаний значение модуля коэффициента отражения в диапазоне рабочих частот до 5,3 ГГц.

2. Предложена и разработана усовершенствованная конструкция коаксиальной камеры, отличающаяся оптимизированной формой согласующих переходов без учета образца материала и использованием нового подхода к измерению эффективности экранирования композитных экранирующих материалов с ее помощью в диапазоне частот до 10 ГГц.

3. Разработана математическая модель для вычисления напряженности электрического поля в рабочей зоне реверберационной камеры, отличающаяся использованием аналитических выражений.

Теоретическая значимость

1. Показано, что совместное использование ряда численных методов и параметрической оптимизации позволяет получить оптимальные геометрические параметры конструкций ТЕМ-камер с коаксиальным и прямоугольным поперечным сечениями в требуемом диапазоне рабочих частот при заданном согласовании.

2. Разработана конструкция усовершенствованной коаксиальной камеры и метод измерения эффективности экранирования материалов на её основе, обеспечивающей диапазон частот измерения до 10 ГГц.

3. Предложена модель распределения электрического поля в реверберационной камере для оценки распределения электрического поля в рабочей зоне камеры в зависимости от геометрических параметров корпуса, а также нижней и верхней граничных частот РК.

Практическая значимость

1. Разработаны электродинамические и твердотельные модели ТЕМ-камеры с оптимальными геометрическими размерами, на основе которых может быть изготовлена ТЕМ-камера для испытаний ИС с высотой профиля не более 5 мм.

2. Разработан лабораторный макет ТЕМ-камеры, позволяющий проводить испытания ИС с высотой профиля не более 5 мм в диапазоне частот до 5,3 ГГц согласно стандартам на помехоэмиссию и помехоустойчивость.

3. Разработаны твердотельные модели коаксиальных камер, на основе которых могут быть изготовлены камеры для измерения эффективности экранирования планарных образцов композитных радиопоглощающих материалов в диапазоне частот до 10 ГГц.

4. Выполнена программная реализация модели распределения электрического поля в реверберационной камере, которая позволяет выполнить приближенную и быструю оценку среднеквадратичного отклонения напряженности электрического поля в рабочей зоне.

5. Результаты использованы в учебном процессе радиотехнического факультета ТУСУРа.

Методология и методы исследования. В работе применены электродинамическое моделирование на основе метода конечных разностей во временной области, метода конечных элементов, метода матрицы линий передачи, параметрическая оптимизация на основе метода доверительных областей, также выполнены натурные эксперименты с помощью векторного анализатора цепей и измерительного приемника.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданная ТЕМ-камера позволяет проводить оценку помехоэмиссии интегральных схем высотой до 5 мм с максимальным значением модуля коэффициента отражения не более минус 15 дБ в диапазоне частот до 5,3 ГГц.

2. Разработанная твердотельная модель усовершенствованной коаксиальной камеры пригодна для изготовления устройства измерения эффективности экранирования композитных материалов в диапазоне частот до 10 ГГц.

3. Разработанная математическая модель распределения электрического поля в реверберационной камере позволяет выполнить приближенную оценку среднеквадратичного отклонения модуля напряженности поля в рабочей зоне с меньшими (до 5850 раз) временными затратами, чем электродинамический анализ.

Достоверность результатов основана на корректном использовании численных методов, а также на согласованности результатов квазистатического и электродинамического подходов, моделирования и натурального эксперимента.

Использование результатов исследований

1. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности, проект 8.9562.2017, 2017–2019 гг.

2. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» в рамках ФЦП ИР (соглашение № 14.574.21.0172 от 26 сентября 2017 г.), 2017–2020 гг.

3. НИР «Исследование эффективности экранирования композитных материалов для их применения в составе экранирующих конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры современных космических аппаратов», грант РФФИ 18-38-00619, 2018–2020 гг.

4. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ 19-79-10162, 2019–2021 гг.

5. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУРа.

6. Регистрация программ для ЭВМ: получено 4 свидетельства.

Использование результатов подтверждено двумя актами внедрения.

Апробация результатов. Результаты работы позволили подготовить заявки и победить в следующих конкурсах: ФЦП ИР (проект №RFMEFI57417X0172); грантов РФФИ (руководитель проекта 18-38-00619) и РФФИ (проект 19-79-10162); на включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа 2018 г. Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2017, 2018 гг.; Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices, Эрлагол (Алтай), 2019 г.; Межд. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», Томск, 2017, 2018, 2019 гг.; Int. multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON), Новосибирск, 2017 г.; Науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» на базе АО «НПЦ «Полюс», Томск, 2018 г.

Публикации. Результаты опубликованы в 17 работах: 2 статьи в журналах из перечня ВАК; 3 доклада в трудах конференций, индексируемых в Scopus и WoS; 8 докладов в трудах отечественных конференций; 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором совместно с Комнатновым М.Е. Постановка цели работы и задач исследования, анализ результатов моделирования и эксперимента, а также формулировка основных результатов и выводов выполнена совместно с научным руководителем. Основной объем моделирования выполнен соискателем лично, часть моделирования выполнена со студентами под руководством соискателя. Экспериментальные исследования проведены лично или с непосредственным участием соискателя. В опубликованных работах [1, 3, 7] соискателем выполнены моделирование и разработка ТЕМ-камеры для испытаний на ЭМС. В работах [2, 5, 9, 10, 13] соискателем выполнены обзор, разработка математической модели реверберационной камеры, а тестирование модели выполнено совместно с авторами публикаций. В работах [6, 8, 11, 12] соискателем выполнен обзор экранирующих материалов, а разработка усовершенствованной коаксиальной камеры выполнена совместно с соавторами. В работах [14, 15] соискателем выполнено тестирование модулей электродинамического анализа и оптимизации. В работе [16] соискателем

выполнены программная реализация алгоритма и тестирование программы, в работе [17] – разработка алгоритма для расчета напряженности электрического поля в рабочей зоне реверберационной камеры.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 165 наим., приложение на 16 с. с копиями актов внедрения, свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, дипломов и грамот. Объём диссертации с приложением – 155 с., в т.ч. 79 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор методов и устройств для испытаний на излучаемую эмиссию и восприимчивость

В разделе 1.1 показана актуальность испытаний РЭС в области ЭМС. В разделе 1.2 приведено описание конструкции ТЕМ-камеры для испытаний ИС и особенностей её разработки. В разделе 1.3 рассмотрены подходы к измерению ЭЭ композитных экранирующих материалов, в том числе с помощью коаксиальных камер. В разделе 1.4 представлено современное состояние исследований по разработке РК и методам проведения испытаний с их помощью. В разделе 1.5 сформулированы цель и задачи работы.

2. ТЕМ-камера для испытаний интегральных схем

2.1 Аналитический и квазистатический расчеты геометрических параметров

Выполнен расчет геометрических параметров в поперечном сечении регулярной части ТЕМ-камеры. Габаритные размеры испытуемого объекта (ИО) ($D \times Ш \times В$) выбраны равными $30 \times 30 \times 5$ мм. Высота ИО должна составлять не более $1/3$ от расстояния между основанием камеры и центральным проводником. При толщине центрального проводника $t = 1$ мм и высоте ИО $y_1 = 5$ мм получены значения параметров: $d = 15$ мм, $b = 31$ мм (рисунок 2.1). Выполнен расчет зависимостей волнового сопротивления Z_0 в поперечном сечении ТЕМ-камеры от отношения ширины центрального проводника к ширине корпуса камеры w/a для разных соотношений a/b с помощью выражений

для экранированной полосковой линии с конечной толщиной центрального проводника. С учетом требования $Z_0 = 50$ Ом, а также с учетом размеров испытательной ПП и размещения ИС с длиной и шириной 30×30 мм, размеры w и a выбраны исходя из соотношений: $a/b = 3,33$; $w/a = 0,4$; $a = 100$ мм; $w = 40$ мм. На основе полученных размеров построена геометрическая модель регулярной части ТЕМ-камеры в системе TALGAT. По результатам квазистатического анализа вычислено $Z_0 = 50,26$ Ом.

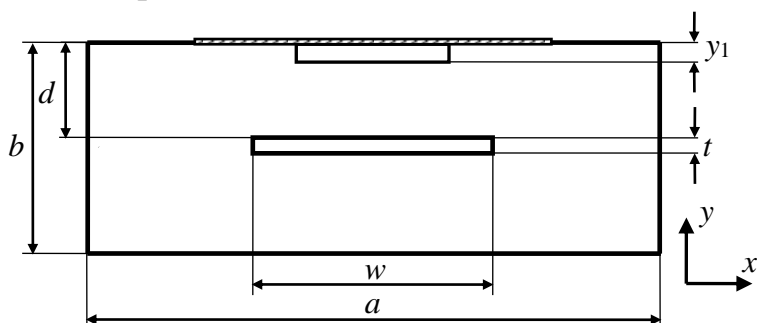


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение ТЕМ-камеры с размещенной сверху ПП с ИС

2.2 Электродинамический анализ

Выполнены разработка и анализ электродинамической модели регулярной части камеры длиной $L = 100$ мм на основе вычисленных геометрических параметров поперечного сечения. Показано, что значения частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ составляют менее минус 55 дБ в диапазоне частот до 6 ГГц, что говорит о согласовании регулярной части камеры с трактом 50 Ом. Для её согласования

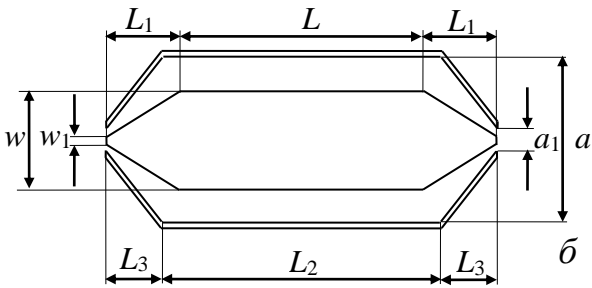


Рисунок 2.2 – Продольное сечение модели ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами

с коаксиальными соединителями типа SMA рассмотрены различные формы коаксиально-полосковых переходов. Сначала выполнен анализ классической конструкции ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами (рисунок 2.2). Ширина корпуса a_1 и центрального проводника w_1 в месте подключения соединителя выбраны исходя из требования $Z_0 = 50$ Ом, при $a/b = a_1/b_1$: $a_1 = 15$ мм, $w_1 = 3,9$ мм. Значения $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами составили менее минус 20 дБ в полосе частот до 4,75 ГГц. Резонансная частота камеры, после которой возбуждаются высшие типы волн, составила 5 ГГц (рисунок 2.5,а). Модель ТЕМ-камеры с корпусом прямоугольной формы представляет собой металлический корпус с габаритами $100 \times 100 \times 30$ мм и размещенным внутри центральным проводником, сужающимся под углом α вблизи соединителя (рисунок 2.3). По результатам оптимизации модели получено $\alpha = 19,4^\circ$. При этом $|S_{11}| \leq -28$ дБ до частоты 4,8 ГГц (рисунок 2.5,б). Рассмотрена ТЕМ-камера с сужающимися согласующими переходами. Уменьшение ширины корпуса выполнено под линейным углом α с прямоугольным выступом на конце сужения, внутри которого расположено круглое отверстие для соединителя, центральный проводник которого припаян к центральной пластине камеры.

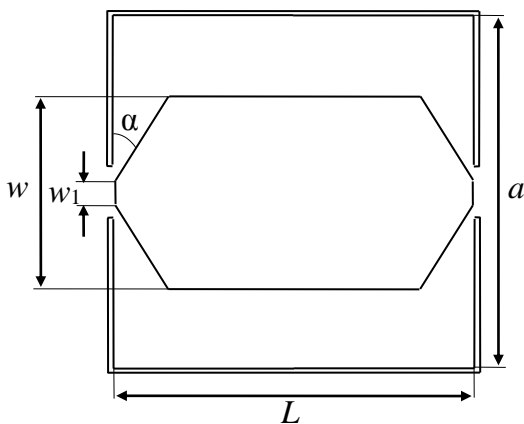


Рисунок 2.3 – Продольное сечение модели ТЕМ-камеры с прямоугольным корпусом

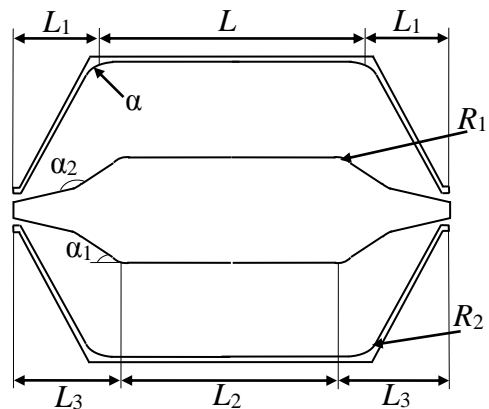


Рисунок 2.4 – Продольное сечение модели ТЕМ-камеры с сужающимися переходами

Уменьшение ширины центрального проводника производится под углом α_1 на расстоянии L_1 от продольной плоскости симметрии камеры и под углом α_2 до

места соединения центрального проводника с соединителем, а также с округлением углов радиусами R_1 и R_2 (рисунок 2.4). По результатам оптимизации $|S_{11}| \leq -30$ дБ в полосе частот до 5,2 ГГц (рисунок 2.5, в). Для дальнейшей разработки выбрана последняя модель ТЕМ-камеры, поскольку она обеспечивает лучшее согласование. Оценка напряженности E -поля выполнена с помощью мониторов поля, размещенных на границах рабочей зоны по сетке 30×30 мм с шагом 15 мм на высоте 2 мм от основания корпуса. Напряженность E -поля имеет неравномерность ± 3 дБ на частотах до 5 ГГц (рисунок 2.6).

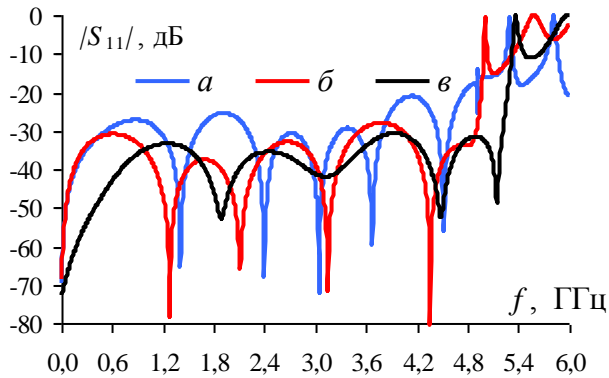


Рисунок 2.5 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камер с пирамидальными переходами (а), с прямоугольным корпусом (б), с сужающимися переходами (в)

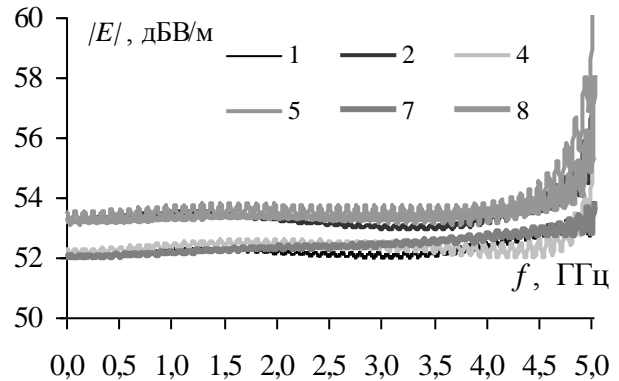


Рисунок 2.6 – Частотные зависимости напряженности E -поля в месте расположения мониторов поля (1, 2, 4, 5, 7, 8) до 5 ГГц

2.3 Разработка лабораторного макета

Разработана твердотельная модель ТЕМ-камеры (рисунок 2.7, а). Конструкция корпуса разделена на две части, соединяемые посредством винтового механического соединения. Разработаны элементы лабораторного макета: испытательный стол, основание и крышка корпуса изготовлены посредством фрезерной обработки алюминиевых плит, центральный проводник выполнен посредством гидроабразивной резки медного листа (рисунок 2.7, б).

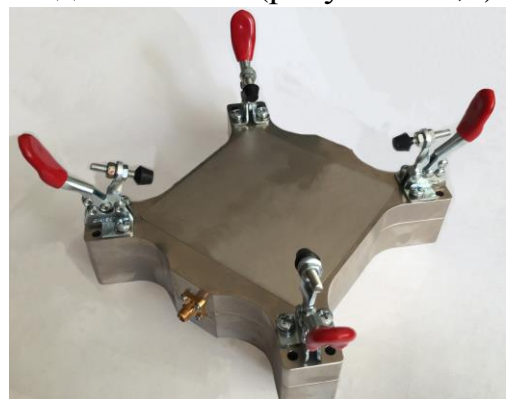
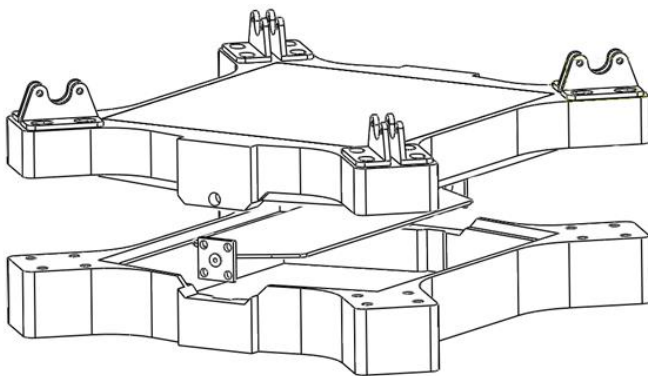


Рисунок 2.7 – Твердотельная модель (а) и лабораторный макет (б) ТЕМ-камеры

На рисунке 2.8 приведены измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 18 ГГц. Из них видно, что $|S_{11}| \leq -17,1$ дБ и $|S_{21}| \geq -1$ дБ до граничной частоты 5,3 ГГц, после которой возбуждаются волны высших типов. На рисунке 2.9 приведено сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ моделей и

лабораторного макета ТЕМ-камеры, при этом максимальное отклонение измеренных значений $|S_{11}|$ от результатов для твердотельной модели составляет 5,1 дБ, а максимальное отклонение от результатов электродинамического моделирования составляет 12 дБ на частоте 4,83 ГГц.

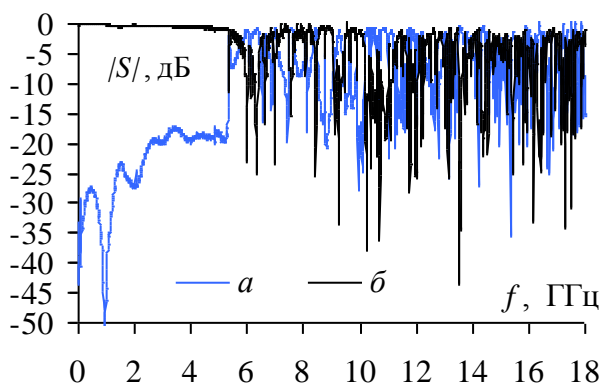


Рисунок 2.8 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) ТЕМ-камеры

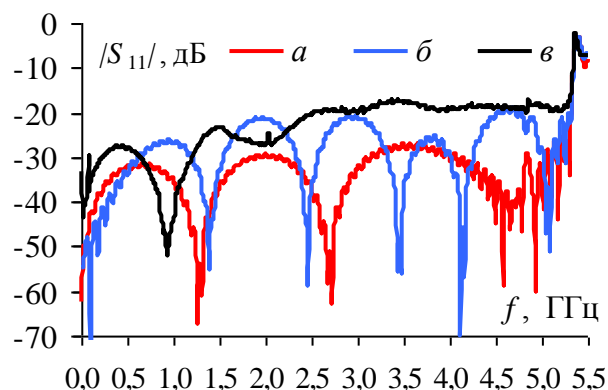


Рисунок 2.9 – Сравнение зависимостей $|S_{11}|$ моделей и лабораторного макета ТЕМ-камеры

2.4 Примеры использования

С помощью разработанной ТЕМ-камеры выполнено измерение излучаемой помехоэмиссии от микроконтроллера модели 1986ВЕ91Т производства АО “ПКК Миландр”. На рисунках 2.10,а-б представлены лицевая и обратная стороны измерительной ПП, при включении питания которой ИС начинает непрерывное формирование ШИМ-сигналов с амплитудой 3,3 В и коэффициентами заполнения 25 и 45% и частотой повторения 70 кГц. Измерение излучаемой помехоэмиссии выполнено при четырех положениях ПП относительно апертуры ТЕМ-камеры (рисунок 2.10,в) посредством ее поворота на каждые 90°.

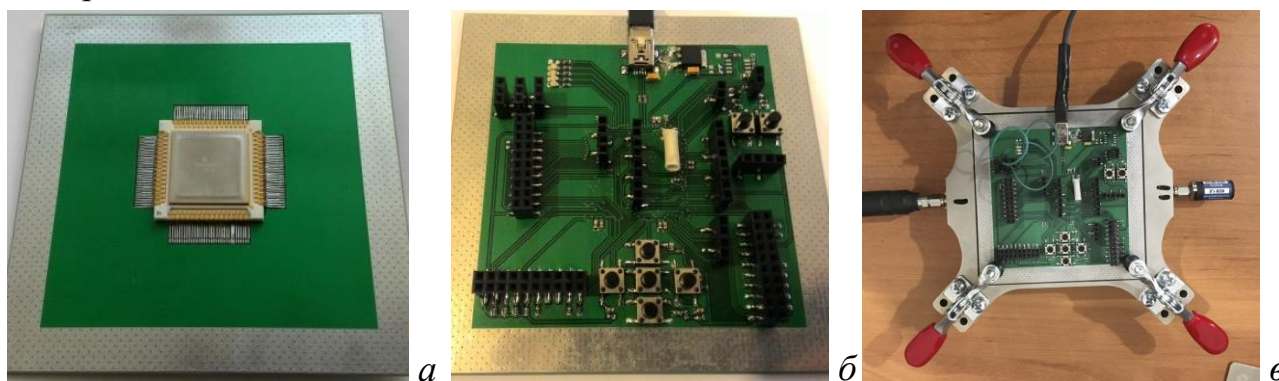


Рисунок 2.10 – Лицевая (а) и обратная (б) стороны ПП с ИС, размещение в ТЕМ-камере (в)

В диапазоне частот 70–80 кГц наблюдается рост эмиссии на 8–9 дБ относительно уровня при выключенной ИС, который определяется формированием прямоугольных импульсов с данными частотами повторения (рисунок 2.11,а). В диапазоне 1–30 МГц наблюдаются эмиссии с амплитудой до 15–20 дБ, определяемые работой кварцевого резонатора и периферийных устройств. При различном положении ПП уровни эмиссии на одних и тех же частотах отличаются на 5–10 дБ (рисунок 2.11,б). Эмиссии на тактовой частоте ИС 80 МГц наблюдаются только при двух вариантах размещения ПП

(рисунок 2.11, в, кривые 2, 3). В диапазоне 1–5,2 ГГц помехоэмиссия на зависимостях не наблюдается, а эмиссии на частотах 1,88 и 2,67 ГГц вызваны работой устройств сотовой связи (рисунок 2.11, з).

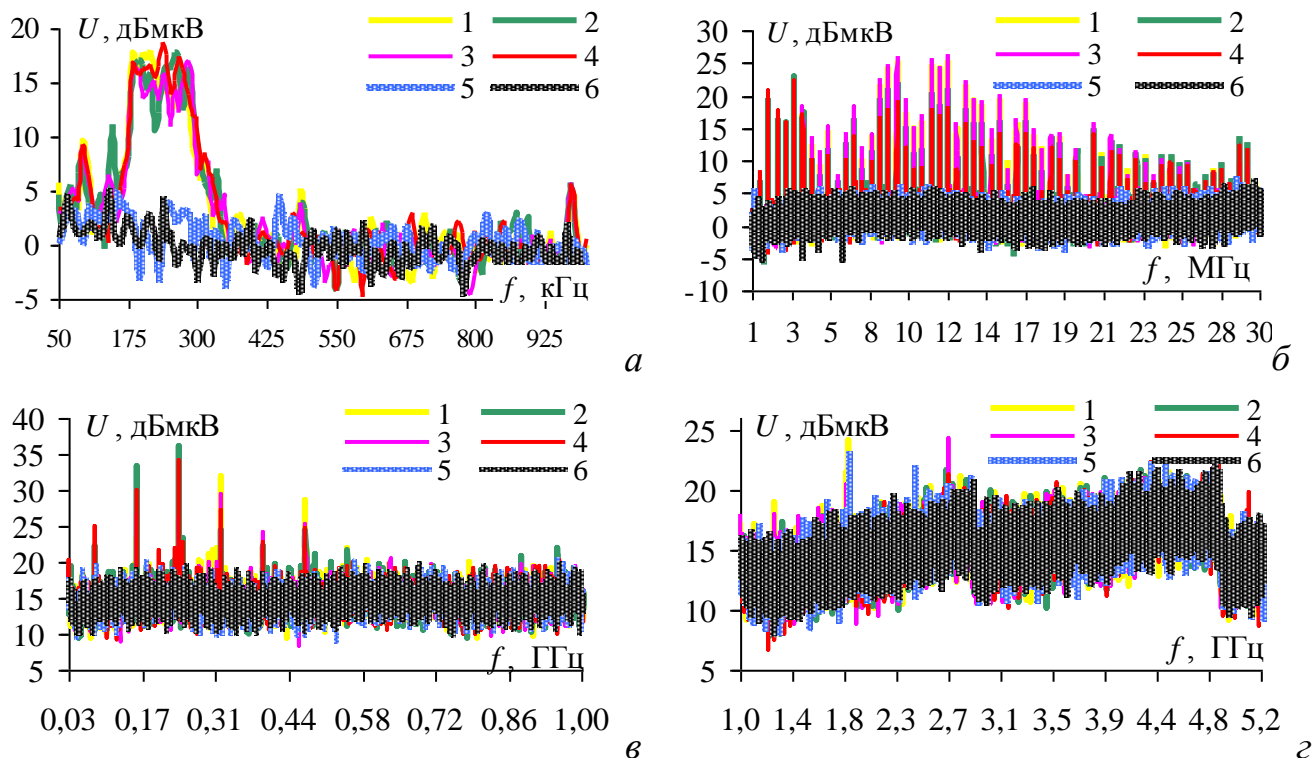


Рисунок 2.11 – Измеренные частотные зависимости напряжения U на входе измерительного приемника на частотах 50 кГц–1 МГц (а), 1–30 МГц (б), 30 МГц–1 ГГц (в), 1–5,2 ГГц (з), полученные при функционировании ИС и ее повороте на каждые 90° в ТЕМ-камере (1–4), при отключенном питании ИС (5), при размещении испытательного стола (6)

3. Коаксиальная камера для измерения эффективности экранирования композитных материалов

3.1 Разработка и анализ регулярной коаксиальной линии

Выполнен электродинамический анализ регулярной коаксиальной линии передачи длиной $L = 200$ мм, подключаемой к тракту посредством соединителей типа SMA (рисунок 3.1, а). Радиусы центрального и внешнего проводников ($r_1 = 1,3$ мм, $r_2 = 2,95$ мм) вычислены исходя из требования $Z_0 = 50$ Ом и учета размеров соединителей. Показано, что модель обеспечивает хорошее согласование с трактом при $|S_{11}| \leq -15$ дБ в диапазоне до 7,3 ГГц (рисунок 3.1, б, кривая 1), а значения $|S_{21}| \geq -0,5$ дБ (рисунок 3.1, б, кривая 2).

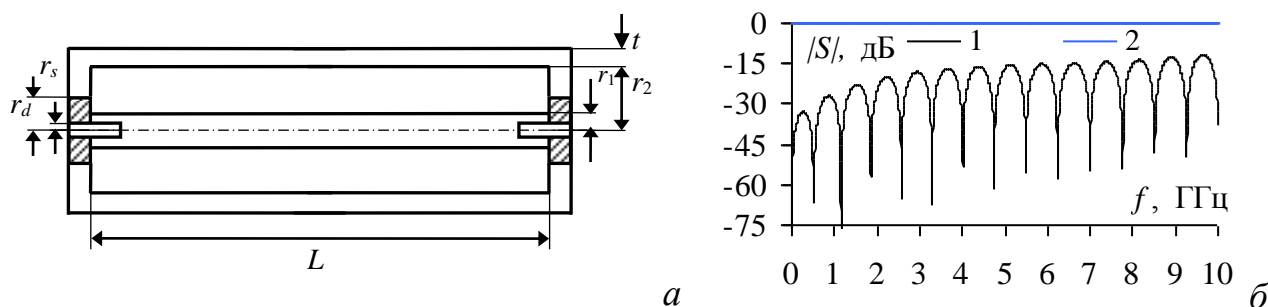


Рисунок 3.1 – Геометрические параметры регулярной коаксиальной линии (а), частотные зависимости $|S_{11}|$ (1) и $|S_{21}|$ (2) её электродинамической модели (б)

Выполнены моделирование, сборка и измерение макета (рисунок 3.2) укороченной коаксиальной линии на основе двух СВЧ-соединителей. Они установлены на цилиндрических контактных площадках радиусом $R = 5$ мм и толщиной $t = 2$ мм, в которых выполнены отверстия для вывода центрального проводника соединителей с радиусом $r = 2,2$ мм. Из полученных результатов видно, что разработанный макет имеет $|S_{11}| \leq -15$ дБ до 6 ГГц, при этом в диапазоне 6–10 ГГц наблюдается рост значений до минус 8 дБ (рисунок 3.3,а), а $|S_{21}| \leq -1$ дБ во всём диапазоне частот (рисунок 3.3,б).

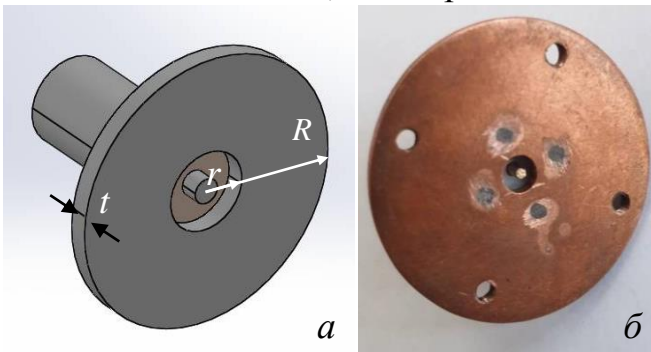


Рисунок 3.2 – Модель (а) и макет (б) укороченной коаксиальной линии

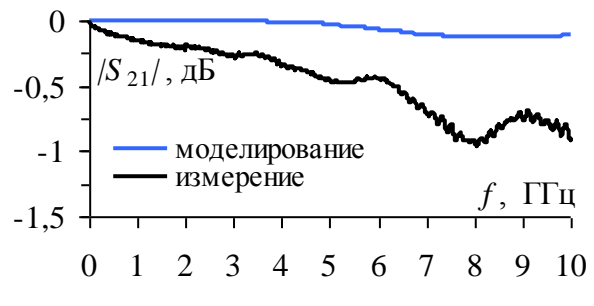
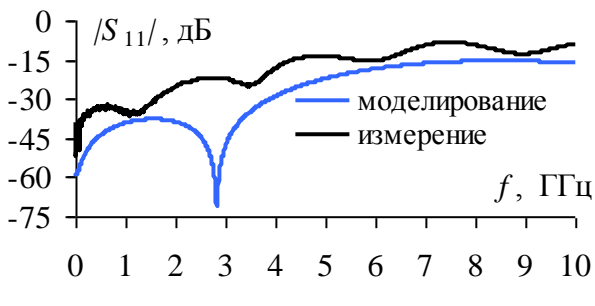


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) укороченной коаксиальной линии

3.2 Электродинамический анализ и оптимизация согласующих переходов

Выполнен анализ моделей коаксиальных камер с различными формами согласующих переходов для $Z = 50$ Ом в диапазоне частот до 10 ГГц. Размеры моделей вычислены с помощью аналитических выражений и параметрической оптимизации с целью минимизации максимума частотной зависимости $|S_{11}|$.

Рассмотрена модель коаксиальной камеры с линейным согласующим переходом (рисунок 3.4,а). Согласование регулярной части с соединителями обеспечивается линейным уменьшением радиусов проводников. Модель с линейными смещенными согласующими переходами (рисунок 3.4,б) характеризуется различными длинами центрального и внешнего проводников в регулярной части и в области подключения соединителей. В модели камеры с экспоненциальными согласующими переходами изменение радиуса внешнего проводника в продольном направлении описывается кривой, проходящей через 5 точек (рисунок 3.4,в). Радиус центрального проводника уменьшается в продольном направлении по кривой, описываемой 4 точками, как показано на рисунке 3.4,г.

Анализ частотных зависимостей S -параметров моделей (рисунок 3.5) выявил, что в исследуемом диапазоне частот модель коаксиальной камеры с экспоненциальными переходами имеет $|S_{11}| \leq -20$ дБ, что обеспечивает наилучшее согласование из рассмотренных вариантов моделей.

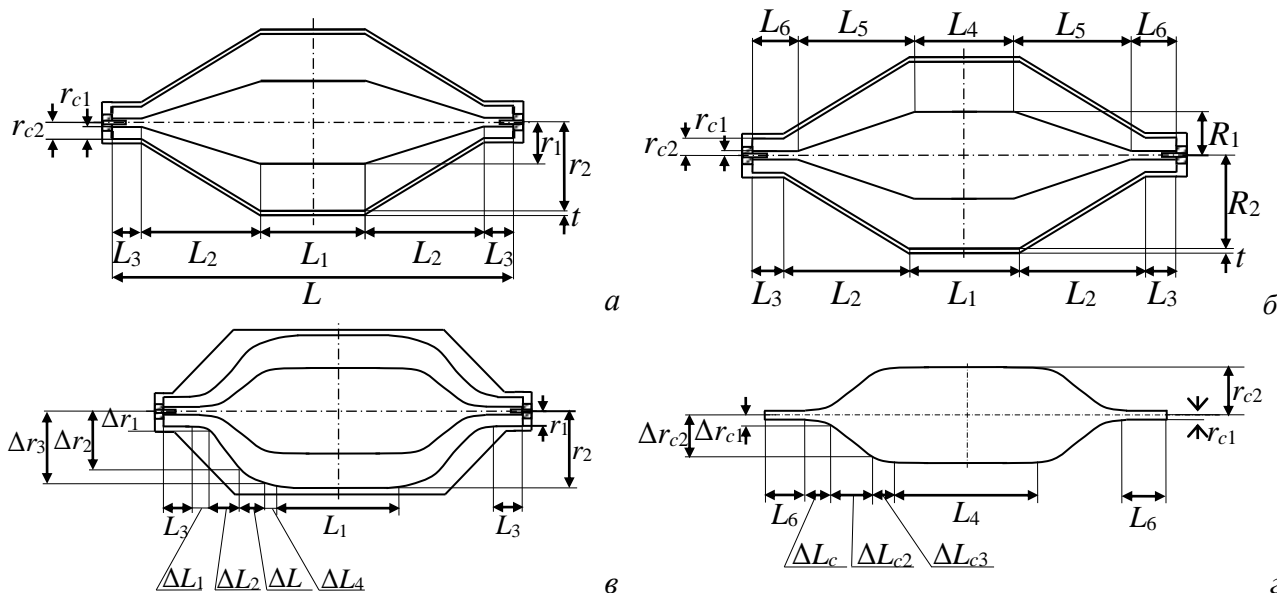


Рисунок 3.4 – Геометрические параметры моделей коаксиальных камер с линейными (а) и линейными смещенными (б) согласующими переходами; геометрические параметры внешнего (в) и центрального (г) проводников модели с экспоненциальными переходами

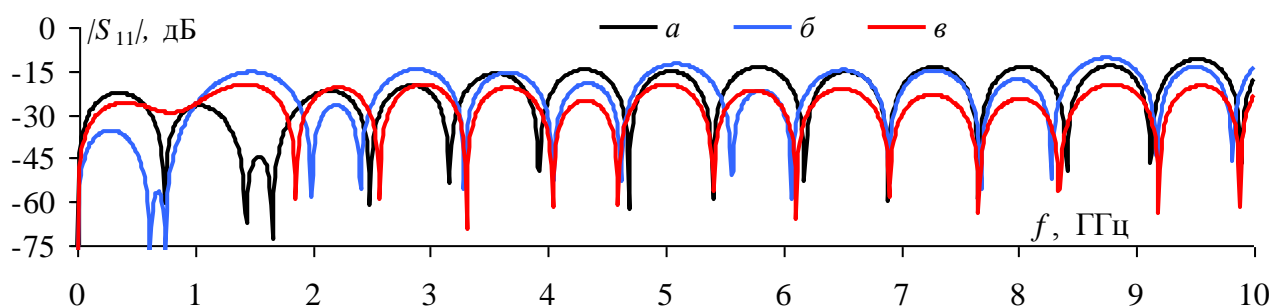


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ моделей коаксиальных камер с линейными (а), линейными смещенными (б) и экспоненциальными (в) согласующими переходами

3.3 Электродинамический анализ вариантов сборки коаксиальной камеры

На основе модели коаксиальной камеры с экспоненциальными переходами созданы твердотельные модели согласно требованиям стандартов по измерениям ЭЭ материалов. Разработана твердотельная модель камеры согласно требованиям стандарта ASTM ES7 (рисунок 3.6,а) и ASTM D4935 (рисунок 3.6,б). Выполнена разработка усовершенствованной коаксиальной камеры, сборка конструкции которой осуществляется посредством резьбового соединения, а на конце одной половины центрального проводника сделан цилиндрический выступ, устанавливаемый в соответствующий паз на второй половине проводника (рисунок 3.6,в).

Проведен вычислительный эксперимент по измерению ЭЭ композитного материала с помощью измеренных частотных зависимостей относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей композита на основе гексаферрита Z-типа. Значения ЭЭ для образца толщиной 1 мм, вычисленные с помощью модели камеры, описанной в стандарте ASTM D4935, являются некорректными на частотах до 0,2 ГГц из-за разрыва центрального проводника

(рисунок 3.7,а). При этом наблюдается совпадение частотных зависимостей ЭЭ для усовершенствованной и стандартной (согласно ASTM ES7) моделей камер (рисунок 3.7,б).

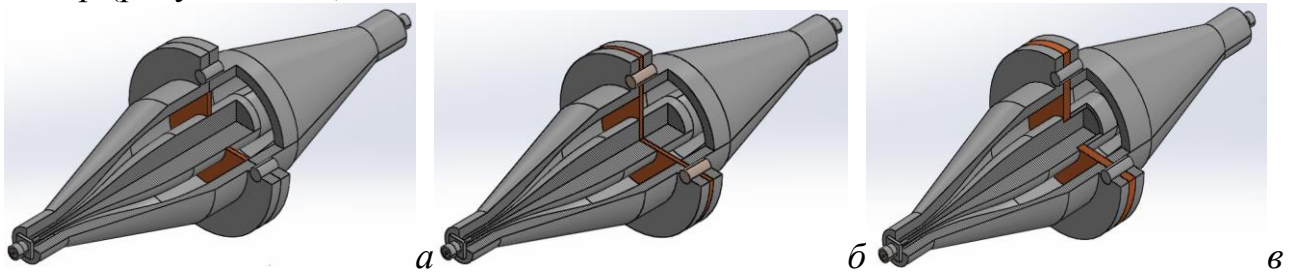


Рисунок 3.6 – Изометрические виды с местным разрезом моделей коаксиальных камер, разработанных согласно стандартам ASTM ES7 (а) и ASTM 4935 (б), форма контрольного образца для испытаний согласно ASTM 4935 (в)

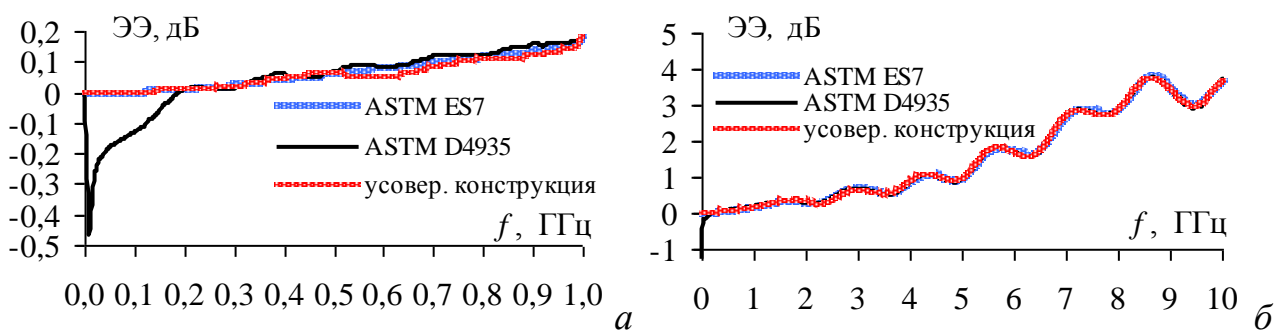


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости ЭЭ в диапазоне частот 0–1 ГГц (а) и 0–10 ГГц (б), вычисленные для образца толщиной 1 мм с помощью разработанных моделей камер

4. Математическая модель распределения электрического поля в реверберационной камере

4.1 Разработка модели

Резонансные частоты возбуждаемых типов волн в РК вычисляются по выражению для прямоугольного резонатора:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2},$$

где c – скорость света в вакууме; m, n, p – целые неотрицательные числа; a, b и d – ширина, длина и высота корпуса РК.

На заданной частоте возбуждается ряд типов волн, суперпозиция которых определяет результирующее ЭМП внутри рабочей зоны РК. Каждому возбуждаемому типу волны на этой частоте соответствует весовой коэффициент I , который определяется соотношением

$$I(f, f_{mnp}) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(f) \left(\frac{f}{f_{mnp}} - \frac{f_{mnp}}{f}\right)^2}},$$

где $Q(f)$ – добротность РК, определяющая отношение накопленной внутри РК энергии ЭМВ к рассеянной за цикл перемешивания волн.

Выражение для расчета компонентов напряженности электрического поля примет вид

$$E_i(f, x, y, z) = \sum_{f_{mnp} \in f \pm \Delta f} I(f, f_{mnp}) (C_{mnp}^{TM} E_{i_{mnp}}^{TM} + C_{mnp}^{TE} E_{i_{mnp}}^{TE}),$$

где i – индекс компонента напряженности поля в декартовой системе координат (x, y или z); C_{mnp}^{TM} и C_{mnp}^{TE} – коэффициенты, учитывающие расположение изотропного излучателя; $E_{i_{mnp}}^{TM}$ и $E_{i_{mnp}}^{TE}$ – компоненты напряженности E -поля, определяемые mnp -типом волны.

4.2 Тестирование программной реализации модели

Выполнен анализ распределения E -поля в РК с габаритами $0,55 \times 0,74 \times 1,2$ м и рабочей зоной $0,25 \times 0,25 \times 0,45$ м. Величина добротности $Q \geq 10^4$ говорит о малых значениях потерь при отражении ЭМВ (рисунок 4.1,а), при этом число возбуждаемых типов волн N удовлетворяет требованиям ($N > 60$) стандарта испытаний (рисунок 4.1,б).

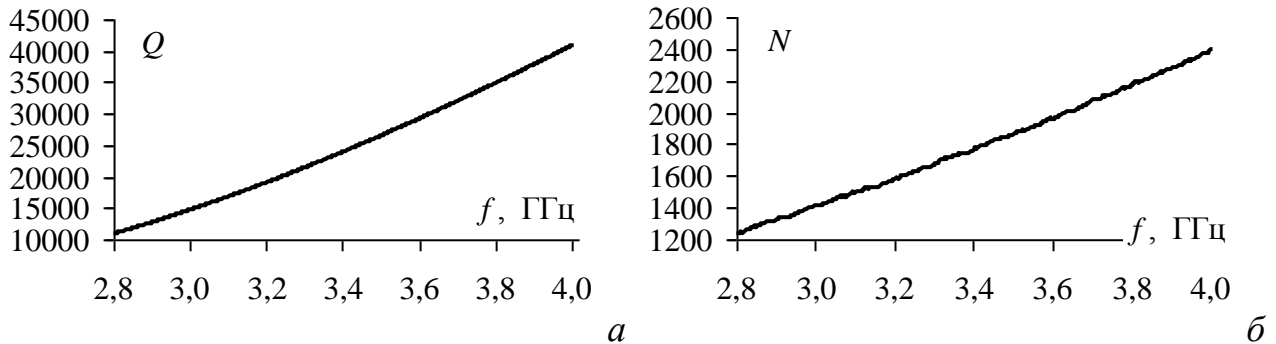


Рисунок 4.1 – Частотные зависимости добротности Q (а) и количества возбуждаемых типов волн (б) в РК

Изменение граничных условий выполняется изменением координат передающей антенны. Напряженность вычислена в 8 точках на границах рабочей зоны (рисунок 4.2,а). Существенное отклонение полученных значений от предельного уровня 1,5 дБ есть только на ряде частот (рисунок 4.2,б).

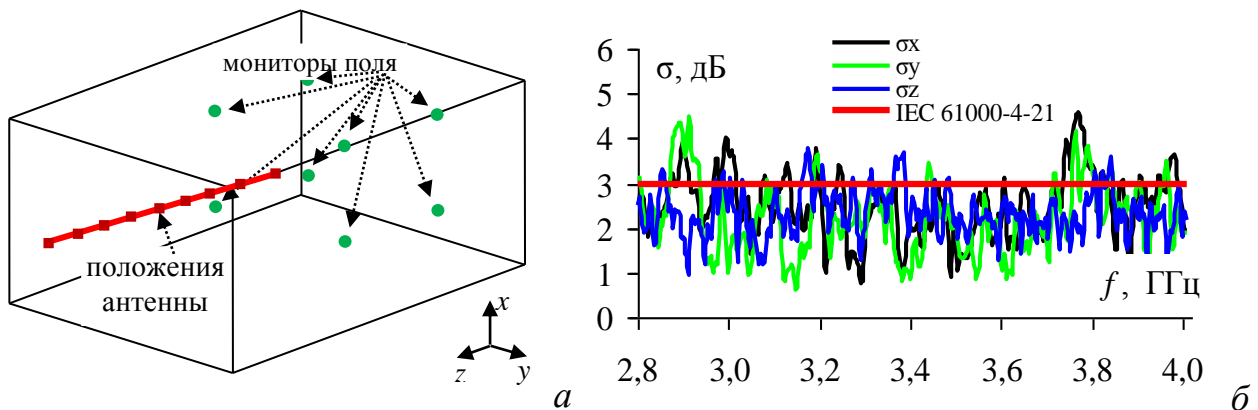


Рисунок 4.2 – Структурная схема модели РК (а) и частотные зависимости среднеквадратического отклонения компонент E -поля (б)

4.3 Сравнение с результатами электродинамического анализа

Разработана модель дисконической антенны с центральной рабочей частотой $f_u = 5$ ГГц и коэффициентом перекрытия диапазона частот $K_\delta = 3$. Значения $|S_{11}| \leq -16$ дБ на частотах 2,5–4,5 ГГц и $|S_{11}| \leq -9$ дБ на частотах 4,5–7,5 ГГц соответственно, что говорит о согласовании антенны с трактом 50 Ом в диапазоне рабочих частот РК. Выполнены построение и электродинамический анализ рассмотренной модели РК (рисунок 4.3,а). Вычисление напряженности E -поля проведено при аналогичном размещении мониторов E -поля в 501 частотной точке в диапазоне частот 2,8–4 ГГц с помощью метода конечных разностей во временной области (МКРВО). На рисунке 4.3,б показаны частотные зависимости $|E_x|$ для монитора поля 1 при 9 положениях антенны. Наблюдается изменение амплитуд и частот пиков на зависимости $|E|$, связанное со смещением частот резонансов собственных типов волн РК.

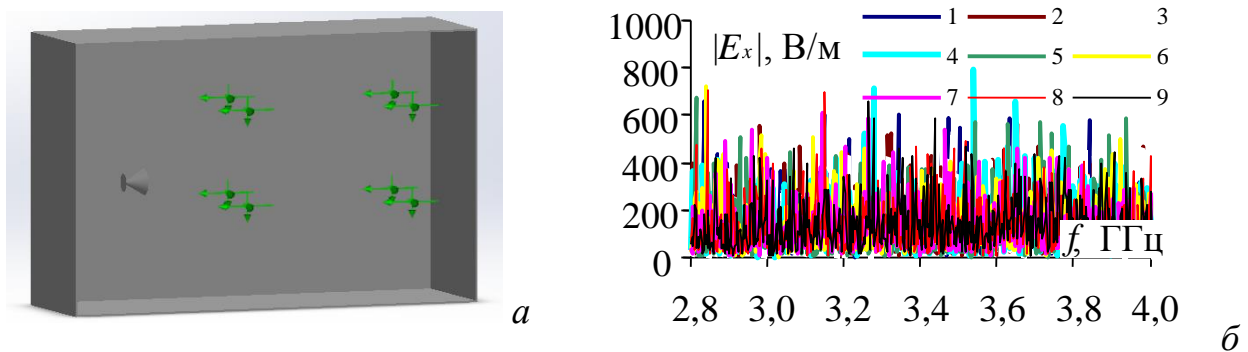


Рисунок 4.3 – Общий вид модели РК с антенной и мониторами E -поля (а) и вычисленные частотные зависимости $|E_x|$ при положениях 1–9 антенны (б)

На основе полученных значений компонентов $|E|$ при 9 положениях антенны выполнен расчет среднеквадратического отклонения. Сравнение вычисленных зависимостей с результатами аналитической модели приведено на рисунке 4.4. При этом зависимости сопоставимы по амплитуде, а среднее значение расхождения результатов в рассматриваемом диапазоне частот составило 0,78 дБ для трех компонентов напряженности E -поля. Временные затраты на анализ модели РК с помощью МКРВО составили 21357 мин, а с помощью аналитической модели – 219 с, что в 5851 раз быстрее электродинамического анализа. Таким образом, разработанная модель может быть использована на стадии проектирования РК для анализа основных показателей и приближенной оценки среднеквадратического отклонения напряженности E -поля.

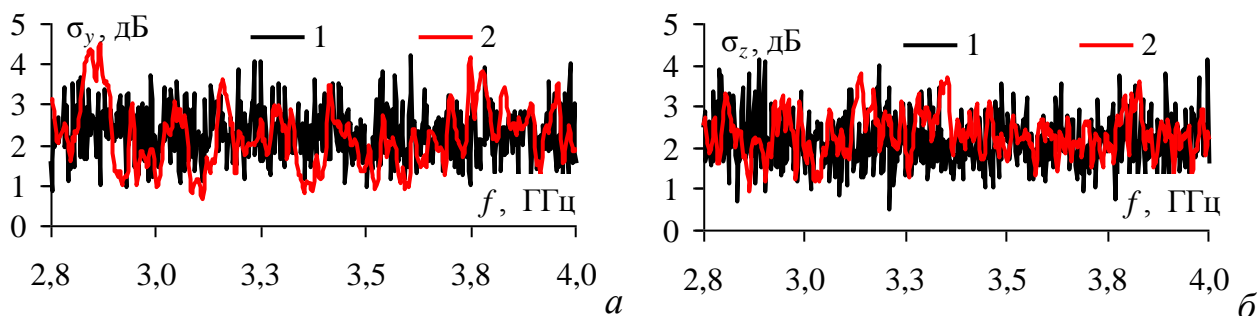


Рисунок 4.4 – Сравнение частотных зависимостей σ_y (а) и σ_z (б), полученных с помощью МКРВО (1) и разработанной аналитической модели (2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Разработана и создана ТЕМ-камера для исследований и испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС с высотой профиля не более 5 мм с максимальным значением $|S_{11}|$ минус 17 дБ в диапазоне рабочих частот до 5,3 ГГц. Приведены результаты оценки помехоэмиссии в разработанной камере для диапазона частот 50 кГц–5,2 ГГц от отечественного микроконтроллера на базе ядра ARM Cortex-M3. Разработана твердотельная модель усовершенствованной конструкции коаксиальной камеры, позволяющей проводить измерения ЭЭ планарных образцов композитных материалов в диапазоне частот до 10 ГГц. Приведены результаты вычислительного эксперимента по определению ЭЭ образцов композитного материала на основе гексаферрита Z-типа и силикона в качестве связующего с толщинами 1 и 2 мм с помощью усовершенствованной и стандартизированных конструкций коаксиальных камер. Разработана и программно реализована математическая модель распределения E -поля в РК для приближенной оценки неравномерности поля в рабочей зоне камеры. На основе вычисления среднеквадратического отклонения компонентов напряженности E -поля согласно требованиям стандарта ECSS, полученных с помощью разработанной программной реализации модели и МКРВО, выявлена удовлетворительная согласованность полученных результатов.

Рекомендации. Созданная ТЕМ-камера может использоваться для проведения испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию ИС, а также малогабаритных РЭС, соответствующих габаритам рабочей зоны, в широком диапазоне частот. Также она может применяться в биомедицинских исследованиях влияния электромагнитных воздействий СВЧ-диапазона на биологические объекты. Разработанная конструкция усовершенствованной коаксиальной камеры и подход к измерению ЭЭ на ее основе могут использоваться для создания экспериментального образца камеры и измерения образцов композитных экранирующих материалов в диапазоне частот до 10 ГГц. Разработанная математическая модель и ее программная реализация распределения E -поля в РК может использоваться для предварительных оценок среднеквадратического отклонения напряженности E -поля и их сравнения с требованиями стандартов испытаний на этапе проектирования РК.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем с помощью разработанного лабораторного макета ТЕМ-камеры планируется исследование помехоэмиссии ИС с различными характеристиками (тактовая частота, разрядность, архитектура) при различной конфигурации их программного обеспечения. Также ТЕМ-камера будет использована в исследованиях по НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ 19-79-10162, 2019–2021 гг. На основе разработанной твердотельной модели усовершенствованной коаксиальной камеры будет разработан лабораторный макет и проведены измерения образцов экранирующих материалов с его

помощью. Результаты моделирования РК с помощью разработанной модели будут использованы при проектировании полнофункционального экспериментального образца РК, что позволит проводить испытания крупногабаритных РЭС на устойчивость к электромагнитным воздействиям с высокой амплитудой напряженности E -поля.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 52–56.

2. Демаков А.В. Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на электромагнитную совместимость / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Электронный журнал «Системы управления, связи и безопасности». – 2018. – № 2. – С. 151–190. – URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf>

Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и(или) Web of Science

3. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 399–402.

4. Demakov A.V. Command console of environmental shielded TEM-chamber / A.V. Demakov, A.V. Osintsev, M.E. Komnatnov // Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 403–405.

5. Demakov A.V. Algorithm for an estimation of the electromagnetic field uniformity in the working volume of a reverberation chamber / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Russia, 2019. – P. 1–5.

Доклады (тезисы) в трудах других конференций

6. Демаков А.В. Обзор коаксиальных камер для измерения эффективности экранирования композитных материалов / А.В. Демаков // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 272–275.

7. Демаков А.В. Модифицированная ТЕМ-камера для испытания интегральных схем на ЭМС / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2017. – Ч. 3. – С. 53–55.

8. Демаков А.В. Разработка коаксиальной камеры для измерения эффективности экранирования композитных материалов / А.В. Демаков, А.М. Артюшкина // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2019. – С. 222–225.

9. Демаков А.В. Аналитическая модель реверберационной камеры / А.В. Демаков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2018. – Ч. 2. – С. 243–246.

10. Сафронова Е.А. Тестирование программной реализации аналитической модели реверберационной камеры / Е.А. Сафронова, А.М. Артюшкина, А.В. Демаков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2018. – Ч. 2. – С. 235–237.

11. Демаков А.В. Обзор методов измерения эффективности экранирования композитных материалов при помощи ГЕМ-камер // Тезисы докладов науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–13 апреля, 2018. – 2018. – С. 86–89.

12. Демаков А.В. Обзор экранирующих материалов / А.В. Демаков, М.А. Зуева // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018. – 2018. – С. 315–318.

13. Демаков А.В. Analysis of the complexity of the algorithm for calculating the electromagnetic field distribution in a reverberation chamber // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2019. – Ч. 4. – С. 82–85.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662520. TALGAT 2016. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 25 человек. Заявка №20166619296. Дата поступления 01 сентября 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.11.2016 г.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611481. TALGAT 2017. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. Всего 23 человека. Заявка №2017663209. Дата поступления 13 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017610414. Quasi-static modeling of GTEM-cells. Авторы: Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Заявка №2016619498. Дата поступления 08 сентября 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.01.2017 г.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660554. Аналитическая модель реверберационной камеры для оценки напряженности электромагнитного поля в рабочей зоне. Авторы: Демаков А.В., Квасников А.А., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Заявка № 2018617321. Дата поступления 13 июля 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.08.2018 г.