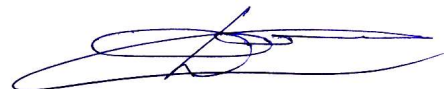


Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Демаков Александр Витальевич

Совершенствование камер для испытаний
на электромагнитную совместимость

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р. техн. наук, доцент Газизов Тальгат Рашитович

Томск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЗОР МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗЛУЧАЕМУЮ ЭМИССИЮ И ВОСПРИИМЧИВОСТЬ.....	11
1.1 Актуальность испытаний в области электромагнитной совместимости	11
1.2 ТЕМ-камера.....	15
1.3 Коаксиальная камера.....	20
1.4 Реверберационная камера.....	26
1.5 Цель и задачи исследования.....	49
2. ТЕМ-КАМЕРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ.....	51
2.1 Аналитический и квазистатический расчеты геометрических параметров.....	51
2.2 Электродинамический анализ.....	53
2.3 Разработка лабораторного макета	60
2.4 Примеры использования.....	67
2.5 Основные результаты раздела.....	73
3. КОАКСИАЛЬНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	75
3.1 Разработка и анализ регулярной коаксиальной линии.....	75
3.2 Электродинамический анализ и оптимизация согласующих переходов	79
3.3 Электродинамический анализ вариантов сборки коаксиальной камеры.....	84
3.4 Основные результаты раздела.....	93
4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ	94
4.1 Разработка модели.....	94
4.2 Тестирование программной реализации модели	100
4.3 Сравнение с результатами электродинамического анализа	108

4.4 Основные результаты раздела.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ	140

ВВЕДЕНИЕ

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 многократно увеличить производительность, а также снизить массогабаритные показатели РЭС, при этом увеличивая их восприимчивость к электромагнитному полю (ЭМП). В связи с этим к современным РЭС предъявляются все более жесткие требования электромагнитной совместимости (ЭМС).

При проведении испытаний на ЭМС необходимо обеспечить условия реальной электромагнитной обстановки, в которой предполагается эксплуатация испытуемого РЭС, что достигается с помощью специализированных испытательных устройств. Так, с помощью ТЕМ-камер выполняются измерения помехоэмиссии и испытания на помехоустойчивость полупроводниковых компонентов, узлов и блоков РЭС, что позволяет оценить их паразитное излучение и надежность функционирования при воздействии ЭМП. Значительный вклад в исследования ТЕМ-камер внесли Е.А. Рахаева, M.L. Crawford, C.M. Weil, K. Malaric, A. Paffi и др. При этом 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 малым по сравнению с металлом весом. 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. При этом 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.

Таким образом, рост рабочих частот и неуклонное развитие источников СВЧ-излучения приводят к необходимости совершенствования методов и устройств для проведения актуальных испытаний РЭС на ЭМС в широких диапазонах параметров воздействий.

Цель работы – усовершенствовать камеры для испытаний радиоэлектронных средств на ЭМС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать усовершенствованную ТЕМ-камеру, пригодную для проведения испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС.

2. Разработать усовершенствованную коаксиальную камеру, пригодную для измерения эффективности экранирования образцов планарных композитных материалов.

3. Разработать и программно реализовать математическую модель для приближенной оценки распределения амплитуд напряженности электрического поля в эффективной рабочей зоне под испытываемый объект РК.

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 диссертационной работы использованы в учебном процессе радиотехнического факультета ТУСУР.

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 федеральная целевая программа» в рамках исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы, проект ФЦП 34/17, 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 магистрантов радиотехнического факультета ТУСУР.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 165 наименований, приложение из 16 с. Объём диссертации с приложением – 155 с., в т.ч. 79 рисунков и 9 таблиц.

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Часть результатов получена с соавторами публикаций. Обработка и интерпретация результатов выполнены автором лично.

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 среднеквадратического 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.

Апробация результатов

Результаты работы позволили подготовить заявки и победить в следующих конкурсах: ФЦП ИР (проект №RFMEFI57417X0172); грантов РФФИ (руководитель проекта 18-38-00619) и РФФ (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 (4 без соавторов):

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	2
Статья в трудах конференций, индексируемых в WoS, SCOPUS	3
Доклад в трудах отечественных конференций	8
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	4
ИТОГО:	17

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В разд. 1 обоснована актуальность испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость, выполнен обзор устройств для испытаний РЭС на ЭМС и измерения ЭЭ планарных образцов композитных материалов. В разд. 2 выполнены разработка и измерения лабораторного макета ТЕМ-камеры, пригодного для проведения испытаний ИС на помехоэмиссию и помехоустойчивость в диапазоне частот до 5,3 ГГц, приведен пример использования макета. В разд. 3 представлены результаты разработки коаксиальной камеры для измерения ЭЭ композитных экранирующих материалов. В разд. 4 приведены результаты разработки алгоритма и программной реализации математической модели РК для вычисления напряженности электрического поля в рабочей зоне РК; приведено сравнение результатов, полученных с помощью разработанной модели и численного метода.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗЛУЧАЕМУЮ ЭМИССИЮ И ВОСПРИИМЧИВОСТЬ

В данном разделе представлен обзор устройств, применяемых для оценки экранирующих свойств композитных материалов [1-3] и испытаний на ЭМС [4].

1.1 Актуальность испытаний в области электромагнитной совместимости

Тенденции развития современной полупроводниковой электронной компонентной базы (ЭКБ), используемой при создании различных радиоэлектронных средств (РЭС), направлены на снижение уровня потребляемой энергии, повышение быстродействия и степени интеграции. Это, как правило, осуществляется за счет перехода на субмикронные технологии производства полупроводниковых элементов, увеличения рабочих частот и снижения уровней питающих напряжений [5], что приводит к увеличению помехоэмиссии от РЭС на высоких частотах [6] и росту их восприимчивости к внешним электромагнитным воздействиям [7]. При этом надежность функционирования РЭС может быть обеспечена за счет безотказной работы всех ее компонентов, в связи с чем актуальна разработка методов и устройств для исследования и испытания ЭКБ и РЭС в целом, что в дальнейшем позволит снизить уровни электромагнитного излучения и восприимчивости ЭКБ к электромагнитному полю (ЭМП) [8, 9]. Особые требования по жесткости испытаний на ЭМС ЭКБ предъявляются к РЭС, входящим в состав гражданского (например в медицине), авиакосмического, военного и атомного сектора, нарушение работы которых влечёт за собой человеческие и материальные потери [10-14].

В настоящее время изучают различные механизмы отказа ИС при воздействии на них мощного ЭМП, что проявляется в виде деградации, повреждения и нарушению работоспособности ИС. Из исследований и испытаний интегральных схем (ИС) на помехоустойчивость известно, что наиболее интенсивные амплитуды токов наводятся на проводники в резонансных структурах, размеры которых близки к половине длины волны при их ориентации относительно направления вектора поляризации воздействующего ЭМП [7]. При

этом к критичным характеристикам излучения относят несущую частоту, плотность потока энергии, длительность и частоту воздействия, поляризацию и угол падения ЭМП [15].

Зачастую для воспроизведения электромагнитной помехи прибегают к прямому локальному воздействию, при котором на вывод ИС подводят сигнал от генератора видео- или радиоимпульсов [16]. При этом ИС в РЭС располагаются на ПП, в состав которых входят токоведущие печатные проводники различных длин, а также другие компоненты, необходимые для работы ИС, что оказывает непосредственное влияние на форму и амплитуду воздействующей наводки. В связи с этим при проведении испытаний ИС на помехоустойчивость необходимо воспроизвести условия, близкие к реальным условиям эксплуатации РЭС, что реализуется за счет использования специализированных испытательных сред, таких как безэховые камеры или открытые испытательные площадки. В то же время подобные испытания являются дорогостоящими и требуют сложной измерительной оснастки, что является нецелесообразным при исследовании малогабаритных ИС на уровне компонента.

Широкое применение нашел метод испытаний на помехоэмиссию [17] и помехоустойчивость [18] ИС в ТЕМ-камере, которая представляет собой устройство на основе линии передачи в виде отрезка прямоугольной коаксиальной линии с воздушным заполнением, согласование которого с СВЧ-соединителями производится посредством пирамидальных переходов. При подведении сигнала от генератора с заданными характеристиками к входу ТЕМ-камеры, в ее внутреннем пространстве распространяется квази Т-волна, которая формирует однородное ЭМП и поглощается согласованной нагрузкой, установленной на СВЧ-соединитель с противоположной стороны камеры. Оценка помехоустойчивости проводится посредством размещения испытуемого объекта (ИО) в регулярной части камеры и воздействия на него ЭМП с требуемой напряженностью электрического E -поля в заданном диапазоне частот, как правило, до частоты первого резонанса, выше которого возбуждаются высшие

типы волн. Частота первого резонанса определяется геометрическими параметрами конструкции ТЕМ-камеры, которые могут быть вычислены относительно высоты ИО.

Тенденция уменьшения минимального размера элемента ИС в 2 раза при переходе на новый этап технологического процесса приводит к увеличению числа транзисторов на кристалле, уменьшению времени задержки распространения сигнала при переключении транзисторов, и, как следствие, росту тактовых частот ИС [19]. При этом линейные размеры в основании корпусов современных микросхем не превышают 30 мм при высоте профиля не более 5 мм (таблица 1.1), что совместно с применением металлизации корпусов и большого числа выводов малых размеров приводит к увеличению помехоэмиссии ИС в сантиметровом диапазоне частот [20]. Частоты сигналов современных ИС могут достигать значений 5-6 ГГц, что приводит к необходимости совершенствования ТЕМ-камер для возможности проведения испытаний в больших диапазонах частот и амплитуд электромагнитных воздействий.

Таблица 1.1 – Геометрические размеры корпусов ИС типа BGA

Производитель	Обозначение корпуса	Длина и ширина корпуса, мм ²	Шаг выводов, мм	Максимальная высота профиля, мм
Texas Instruments [21]	S-PBGA-N1031	25×25	0,65	2,81
	S-PBGA-N980	14×14	0,4	0,55
	S-FCBGA-N164	10×10	0,65	0,83
	S-PBGA-N240	15×15	0,8	1,4
АО «Миландр» [22]	МК 5152.52-1	11,3×11,3	0,7	2,06
	МК 5153.64-1	13,4×13,4	0,7	2,06
	МК 8307.144-АНЗ	16,3×16,3	1,27	3,45
	МК 5152.52-1	11,3×11,3	0,7	2,06

Для уменьшения паразитного излучения ИС при корпусировании применяются радиопоглощающие материалы для рассеивания энергии электромагнитной волны (ЭМВ) в тепло [23]. При этом технологии производства композитов позволили создать образцы материалов с низкой массой и высокой эффективностью экранирования (ЭЭ) на частотах до 100 ГГц [24], что определяет

перспективность их использования в корпусах ИС. Поэтому оценка характеристик экранирования образцов композитных материалов в зависимости от их геометрии и частотного диапазона также является важной задачей, решаемой посредством измерения количественной меры затухания ЭМВ, распространяющейся через экран из исследуемого материала, расположенного между источником и рецептором ЭМВ. Для данного применения актуально исследование характеристик экранирования композитов в ближней зоне, поскольку в ее границах морфология композитного материала оказывает существенное влияние на распространение ЭМВ [23]. Причем независимо от типа экранирующего материала, в цикле его разработки и производства обязательно присутствует процесс измерения его ЭЭ, для чего применяются устройства на основе линии передачи в виде коаксиального волновода с расположенным внутри цилиндрическим проводником [25, 26]. При этом актуально совершенствование подходов и устройств на их основе, которые позволят проводить исследования экранирующих свойств материалов в более широком диапазоне частот.

Активно разрабатывается ЭКБ для устройств мобильной связи пятого поколения с рабочими частотами 28 ГГц [27, 28], при этом её дальнейшее совершенствование направлено на освоение частотного диапазона 40–90 ГГц [29], в связи с чем возникает необходимость в разработке новых методов и устройств для испытаний РЭС не только специального назначения, но и для гражданского сектора, в диапазоне миллиметровых волн. Для проведения подобных исследований применяются электромагнитные реверберационные камеры (РК) [30], характеризующиеся минимальными затратами на формирование ЭМП высокой напряженности, а верхняя граничная частота испытаний определяется предельным значением частоты работы контрольно-измерительного оборудования. В последнее время, исследования в данной области направлены на поиск конфигурации РК с минимальной неравномерностью формируемого ЭМП в месте расположения ИО, для чего используются численные методы, позволяющие на этапе проектирования

выполнить оценку характеристик РК с учетом реальной структуры используемых в конструкции элементов. Разработка новых подходов для вычисления распределения ЭМП в РК с минимальными временными затратами является актуальной задачей.

1.2 TEM-камера

TEM-камера представляет собой устройство основе линии передачи, предназначенное для формирования эталонного ЭМП в закрытой экранированной среде [31]. Конструкция камеры состоит из симметричного отрезка регулярной части прямоугольной коаксиальной линии, соединяемого с СВЧ-соединителями посредством согласующих пирамидальных переходов (рисунок 1.1).

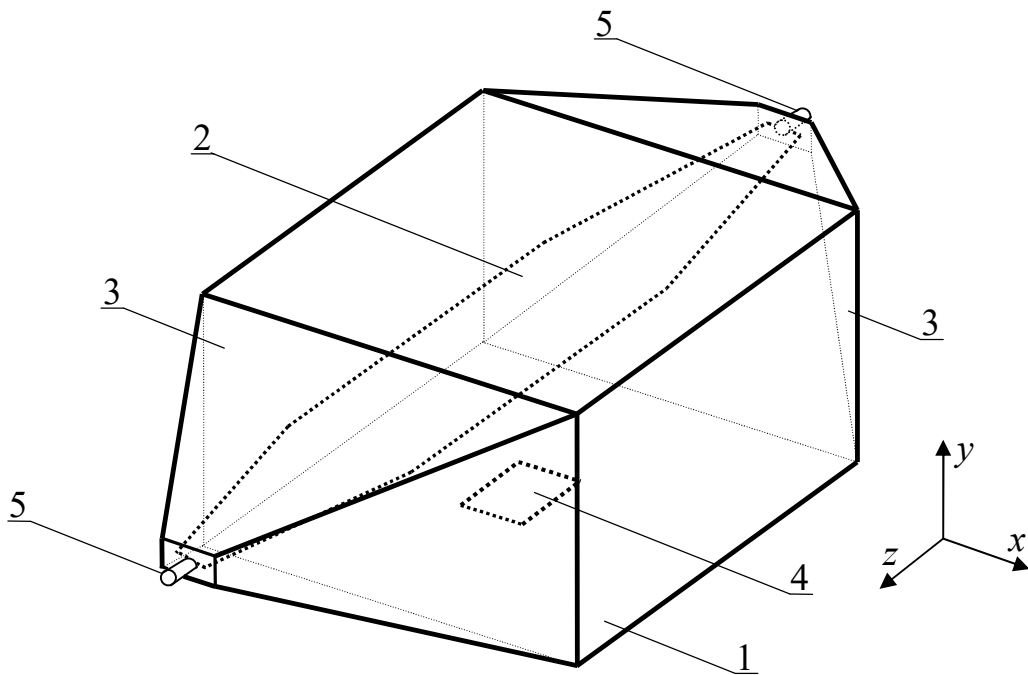


Рисунок 1.1 – Общий вид TEM-камеры (1 – экранированный корпус, 2 – центральный проводник, 3 – пирамидальные переходы, 4 – место под испытуемый объект, 5 – СВЧ-соединители)

При подаче на вход камеры сигнала с заданными характеристиками (длительность, амплитуда, коэффициент модуляции) в ее регулярной части распространяется поперечная ЭМВ (волна типа TE_{10}), которая воздействует на ИО и поглощается согласованной нагрузкой.

Помехоэмиссия согласно [17] измеряется при размещении ИО в регулярной части камеры и измерениях наведенных на центральный проводник токов от ИО при помощи измерительного приемника. Оценка помехоустойчивости осуществляется при аналогичном размещении ИО, при этом среднеквадратическое отклонение напряженности E -поля в месте расположения ИО согласно стандарту [18] не должно превышать значения ± 3 дБ. Данное требование выполняется за счет постоянства волнового сопротивления в каждом элементарном поперечном сечении ТЕМ-камеры, обычно равного типовому значению 50 Ом. Помимо испытаний на ЭМС, данное устройство также используется для калибровки датчиков E -поля [32] и биомедицинских исследований влияния ЭМП на живые ткани [33].

Напряженность поля при расстоянии d между стенкой корпуса и центральным проводником в регулярной части камеры (рисунок 1.2), где поле уже сформировано и однородно, равна [31]

$$E_v = \frac{V_c}{d}, \quad (1.1)$$

где V_c – напряжение на входе камеры.

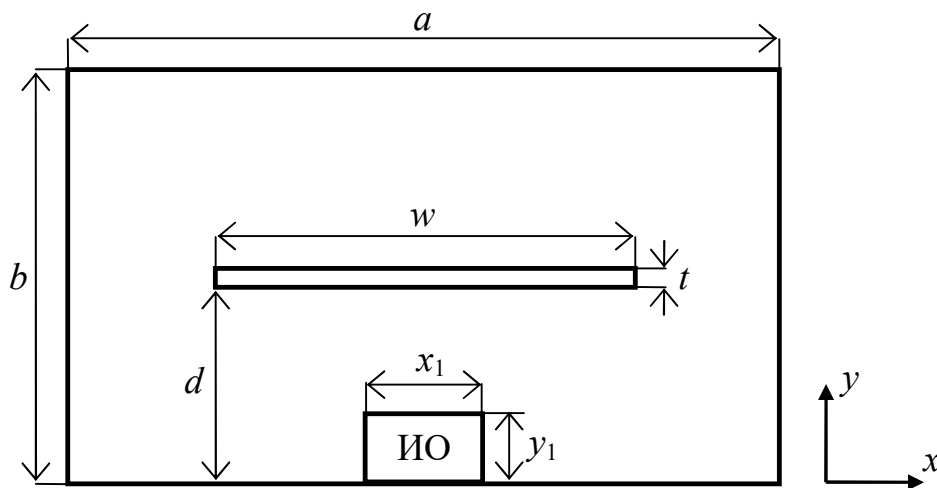


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение ТЕМ-камеры

Исходя из расчетных критериев, высота ИО y_1 должна составлять не более $1/3$ от расстояния d для равномерного распространения поперечной ЭМВ в прямоугольном волноводе [34].

Расчёт волнового сопротивления в поперечном сечении ТЕМ-камеры выполняется по выражению [35]

$$Z_0 = \frac{n_0}{4 \left[\frac{w}{b-t} + \frac{C_f'}{\varepsilon_0} \right]}, \quad (1.2)$$

где C_f' - погонная ёмкость, определяемая для соотношения $\frac{a-w}{2b} \geq 0,4$ как

$$\frac{C_f'}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{b}{b-t} \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right) + \ln \left(\frac{t(2b-t)}{(b-t)^2} \right) + \ln \left[\coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] \right] \dots, \quad (1.3)$$

а для $\frac{a-w}{2b} < 0,4$ как

$$\frac{C_f'}{\varepsilon_0} = \frac{2b}{\pi(b-t)} \ln \left[1 + \coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] + \frac{t}{a-w} \dots \quad (1.4)$$

Согласно экспериментальным оценкам [36], для формирования эталонного воздействия на ИО его длина должна составлять не более 1/3 от длины регулярной части L , при этом длины пирамидальных переходов выбирают равными

$$L_1 = \frac{L}{2}, \quad (1.5)$$

а для обеспечения согласования длина центрального проводника в его регулярной части выбирается из соотношения (рисунок 1.3)

$$L_2 \approx 0,92L. \quad (1.6)$$

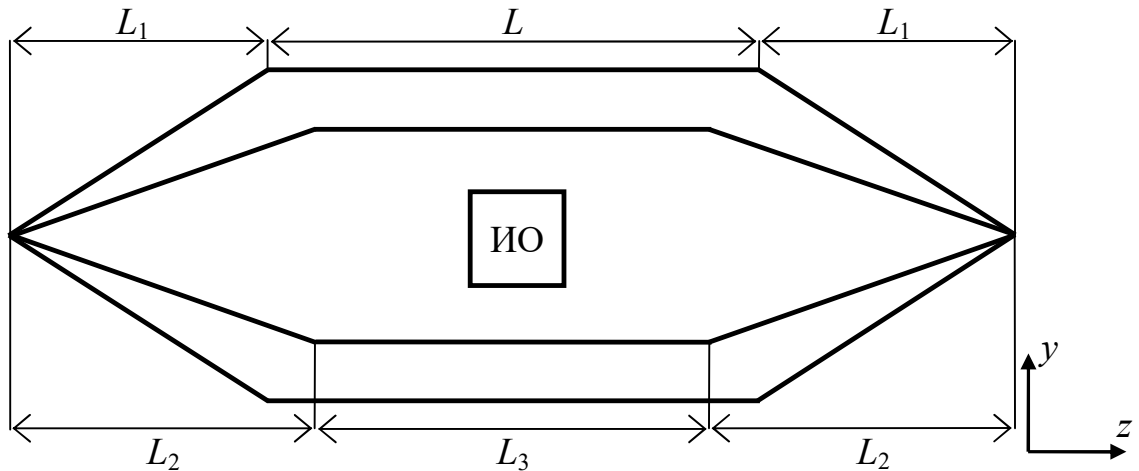


Рисунок 1.3 – Вид сверху продольного сечения ТЕМ-камеры

При разработке ТЕМ-камер применяется математическое моделирование, в основе которого лежат численные методы, позволяющие на этапе проектирования оценить характеристики разрабатываемого устройства на основе математической модели [37]. Анализ трехмерной модели ТЕМ-камеры методом конечных разностей во временной области (МКРВО) выявил зависимость неравномерности формируемого ЭМП от размеров и электрических свойств вносимого в рабочую зону ИО [38]. Также с помощью МКРВО выполнено сравнение распределения ЭМП, формируемого в ТЕМ-камере и в условиях свободного пространства. Разработана метрика, определяющая зависимость неоднородности E -поля от размеров ИО и выявлено возникновение резонансов на рабочих частотах камеры при внесении ИО во внутреннее пространство камеры [39].

Оценка влияния высших мод на равномерность распространения поля в ТЕМ-камере, представленная в работе [40], показала необходимость правильной ориентации датчиков поля относительно направления распространения поля внутри камеры. Рассмотрены две различные конфигурации расположения датчиков E -поля в прямоугольном вырезе в боковой стенке параллельно центральному проводнику при ориентации датчика перпендикулярно распространению ЭМП и в верхней стенке параллельно распространению ЭМП. В обоих случаях вырез оказывает минимальное влияние, поскольку поверхностные токи на стенках камеры параллельны оси распространения

основной моды E -поля. Сравнение измерений равномерности E -поля при разных расположениях датчиков на частотах 500 МГц и 2,45 ГГц показало расхождение результатов порядка 10%.

Для подавления волн высших типов, в работе [41] представлена конструкция ТЕМ-камеры, в которой центральный проводник из металла заменен на двуслойную ПП, на поверхности которой расположены резисторы номиналом 40 Ом. Данный подход позволил снизить влияние резонансов высших типов волн на коэффициент отражения камеры, причем модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ не превысил уровня минус 16 дБ в диапазоне рабочих частот до 3 ГГц.

Из работы [42] известно, что для достижения повторяемости результатов измерения помехоэмиссии ИС с расхождением результатов не более ± 1 дБ, $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры не должен превышать уровень минус 20 дБ. Для достижения согласования ТЕМ-камеры с волновым сопротивлением контрольно-измерительного оборудования оптимизируются параметры центрального проводника в местах его крепления к корпусу соединителя, а также длины центральной и сужающихся частей, что позволило добиться значения КСВН менее 1,02 при разработке ТЕМ-камеры для испытаний ИО с высотой 60 мм на частотах до 230 МГц [43]. В работе [44] представлено применение метода отображения пространств проектных параметров для разработки экранированной полосковой линии. Представленный подход отличается использованием схемной и электродинамической моделей для ускорения нахождения оптимальных геометрических параметров исследуемой структуры, что позволило добиться значения $|S_{11}|$ разработанной полосковой линии менее минус 21 дБ в диапазоне частот до 4,4 ГГц.

Исследуются подходы для увеличения внутреннего испытательного пространства, один из которых основан на проектировании конструкции камеры с волновым сопротивлением 75 Ом. Результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ) и измерений ТЕМ-камеры, разработанной на основе данного подхода [34], выявили сходимость ($\text{КСВН} \leq 1,1$) в диапазоне рабочих частот

900-935 МГц. Также исследуются асимметричные ТЕМ-камеры, которые отличаются от оригинальной конструкции (рисунок 1.1) смещением центрального проводника относительно его высоты [45]. Анализ неоднородности E -поля с помощью МКРВО во внутреннем пространстве ассиметричной ТЕМ-камеры показал, что в пространстве над центральным проводником, где расстояние между проводником и основанием камеры минимально, E -поле характеризуется высокой однородностью, в то время как в нижней испытательной зоне среднеквадратическое отклонение напряженности составило 5 дБ [46]. Современные подходы к совершенствованию ТЕМ-камер направлены на гибридизацию с другими испытательными устройствами, например, с климатической камерой [47], что позволит оценить помехоэмиссию и помехоустойчивость РЭС при различных температурах и влажности в зоне испытания.

1.3 Коаксиальная камера

Существует два основных подхода к измерению ЭЭ материалов. Первый подход основан на использовании экранированной камеры, внутри которой располагается приёмная измерительная антенна, направленная на апертуру в стенке камеры, в которой закрепляется образец материала [48]. Передающая антенна находится снаружи экранированной камеры и используется для излучения ЭМВ. При этом ЭЭ образца определяется через отношение коэффициента передачи между приемной и передающей антеннами при размещении образца в апертуре и без него. Всё контрольно-измерительное оборудование располагается внутри безэховой камеры, используемой для уменьшения влияния отраженных и внешних ЭМВ на результаты измерений (рисунок 1.4). К достоинствам методики измерений согласно стандарту [48] относят широкий диапазон частот и возможность измерения ЭЭ любых твёрдых материалов, а также порошков и жидкостей (в соответствующих контейнерах). При этом для получения точных оценок необходимо корректное взаимное расположение приемной и передающей антенн. Данный метод является

достаточно трудоемким и дорогостоящим, особенно при измерениях в области низких частот ввиду больших габаритов антенн и безэховой камеры.

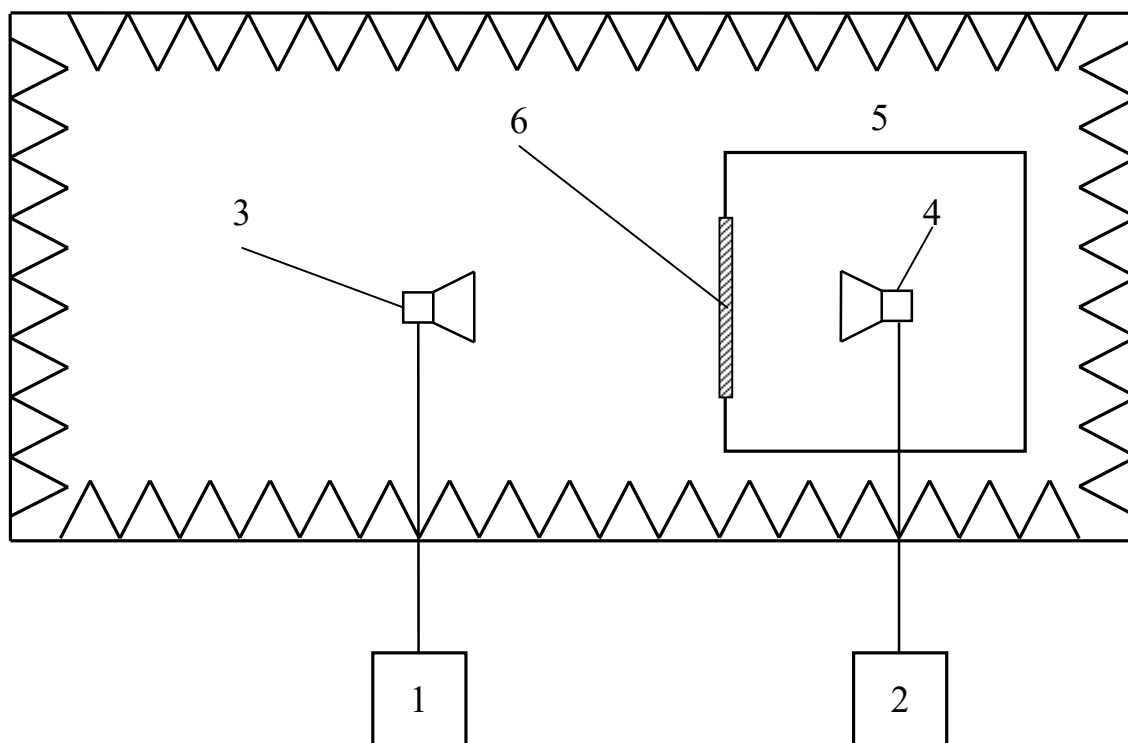


Рисунок 1.4 – Упрощенная схема измерения ЭЭ согласно [48] (1- источник сигнала, 2- анализатор спектра, 3- передающая антенна, 4- приемная антенна, 5- экранированный корпус, 6- образец материала)

Второй подход к измерению ЭЭ основан на применении устройств на основе линий передачи. Согласно стандарту ASTM E57 [25] измерения проводятся в камерах, конструкция которых представляет собой отрезок линии передачи в виде изолированных друг от друга соосных конических проводников. Соответствующие коаксиальные камеры состоят из непрерывного центрального проводника (рисунок 1.5 а). Измерения ЭЭ проводятся только при условии однородного заполнения измеряемым материалом пространства между проводниками камеры, для чего образец материала выполняют в виде круга с отверстием в центре. Формально стандарт ASTM E57 является недействующим (отозван в 1988 г.), однако на текущий момент согласно ему разрабатываются испытательные устройства, позволяющие проводить измерения в диапазоне до 3 ГГц [49]. Согласно действующему стандарту ASTM D4935 [26] образец

материала выполняют круглой формы без отверстий и размещают в зазоре между разделенными симметричными секциями камеры (рисунок 1.5 б). Данный метод, в основном, применяется для измерений экранирующих материалов, наносимых на диэлектрическую подложку [50], экранирующих тканей [51] и препреговых металлических сеток [52], при этом имеет ограничение в области нижних частот из-за разрыва электрического контакта в центральном проводнике, в связи с чем измерения данным методом проводятся на частотах от 30 МГц [53].

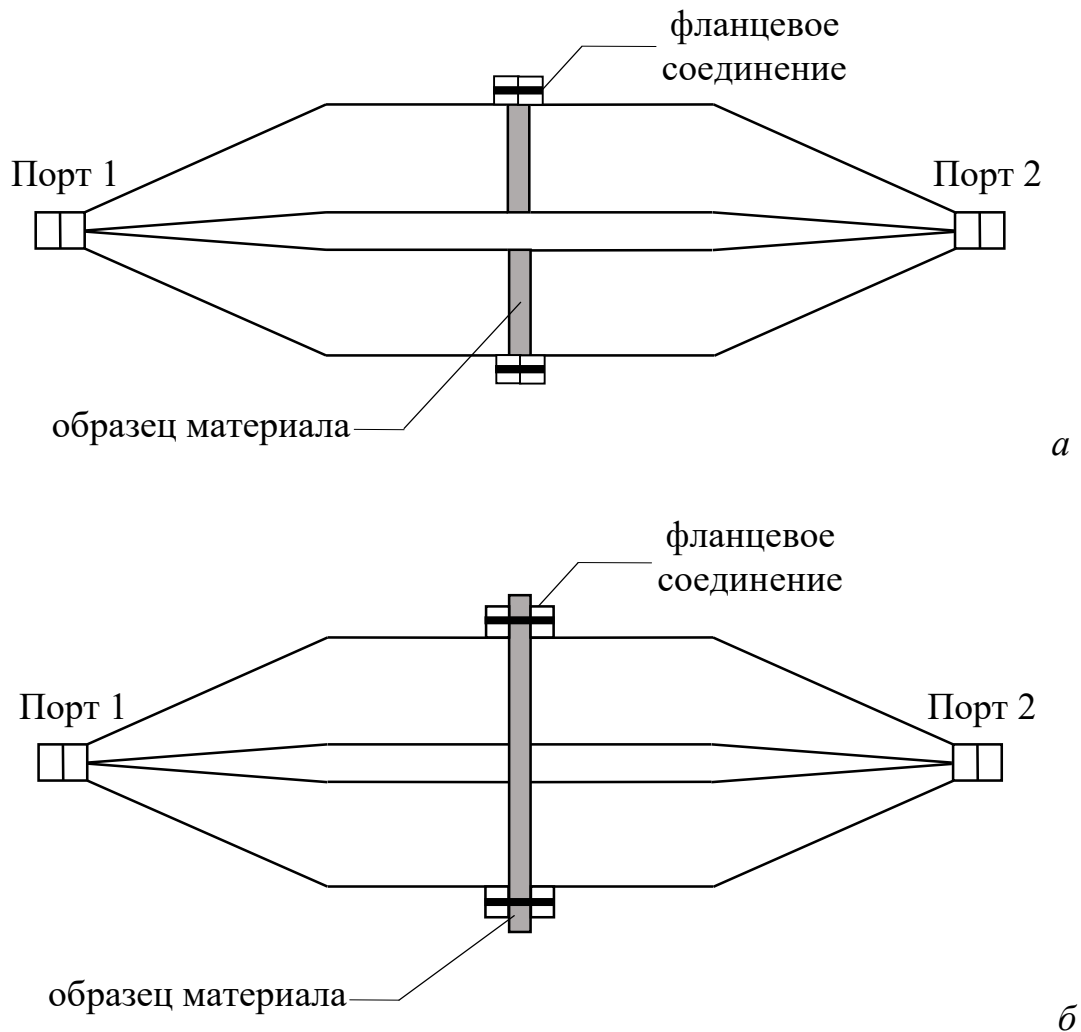


Рисунок 1.5 – Конструкции коаксиальных камер:
с неразрывным (а) и разрывным (б) центральными проводниками

Принцип измерения ЭЭ в коаксиальной камере заключается в измерении потерь при распространении поперечной ЭМВ вдоль коаксиальной камеры с размещенным внутри образцом материала толщиной t_o (рисунок 1.6).

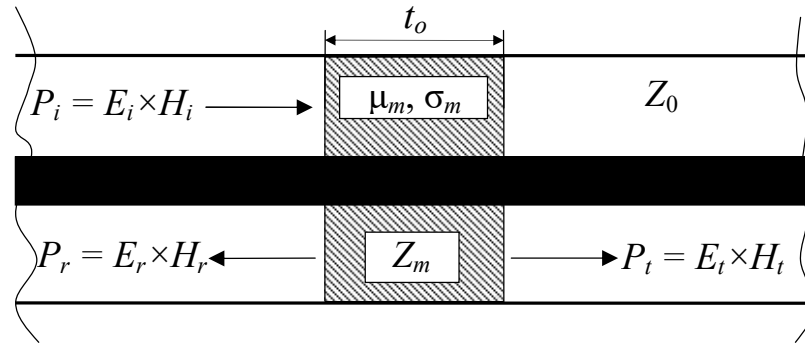


Рисунок 1.6 – Модель распространения ЭМВ

в коаксиальной камере с расположенным внутри образцом материала

Из-за разницы волнового сопротивления среды распространения Z_0 и образца материала Z_m падающая волна, характеризующаяся мощностью P_i , отражается от поверхности экрана, что приводит к образованию отраженной волны мощностью P_r , поглощению мощности P_a и проникновению через экран мощности P_t , что выражается в соотношении

$$P_i = P_r + P_a + P_t. \quad (1.7)$$

Оценка ЭЭ материала может быть выполнена при помощи измерения векторным анализатором цепей S -параметров коаксиальной камеры с помещенным внутрь камеры образцом материала и без него. Используя S -параметры, возможно оценить мощность отраженной и прошедшей ЭМВ в заданном диапазоне частот. Мощность P_r отраженной ЭМВ (по порту 1), определяется как

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_i}. \quad (1.8)$$

Мощность P_t прошедшей ЭМВ от порта 1 в порт 2 определяется как

$$|S_{21}|^2 = \frac{P_t}{P_i}. \quad (1.9)$$

Таким образом, выражение для вычисления ЭЭ согласно стандарту [25] примет вид

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{21}} \right|, \quad (1.10)$$

а согласно стандарту [26]

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{S_{21u}}{S_{21l}} \right|, \quad (1.11)$$

где S_{21u} – коэффициент передачи коаксиальной камеры с контрольным образцом, S_{21l} – коэффициент передачи камеры с образцом материала.

Волновое сопротивление коаксиальной линии может быть вычислено по выражению [54]:

$$Z = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right), \quad (1.12)$$

где $\eta_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды, r_1 – радиус активного проводника, r_2 – радиус опорного проводника.

Диаметры для проводников коаксиальной камеры вычисляются исходя из требований к верхней граничной частоте рабочего диапазона (до частоты возбуждения моды TE_{11}) и равенства Z заданному значению. Граничная частота камеры определяется частотой возбуждения моды TE_{11} [50]

$$f_{TE_{11}} = \frac{c}{\pi(r_1 + r_2)}, \quad (1.13)$$

где c – скорость света в свободном пространстве.

Значения радиусов активного r_1 и опорного r_2 проводников определяются согласно выражениям

$$r_1 = \frac{c}{\pi f_{TE_{11}}} \left(\frac{1}{1 + e^{2\pi Z_0/\eta_0}} \right), \quad (1.14)$$

$$r_2 = \frac{c}{\pi f_{TE_{11}}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{2\pi Z_0/\eta_0}} \right). \quad (1.15)$$

Выбор внешнего радиуса r_3 опорного проводника является достаточно важным для конструкции камеры (рисунок 1.5 б), поскольку, с одной стороны, значение r_3 должно быть как можно больше для обеспечения сильной емкостной связи между двумя половинами опорного проводника (в сборке камеры). С другой стороны, необходимо уменьшить количество возможных резонансов, проявляющихся от стыков и неровностей соединяемых поверхностей, а также из-за ограничений, связанных с размером образца материала (рисунок 1.7).

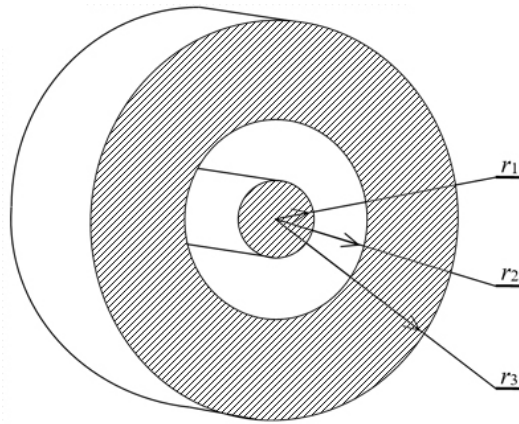


Рисунок 1.7 – Поперечное сечение регулярной части коаксиальной камеры

Важной задачей при разработке конструкции коаксиальной камеры является обеспечение согласования камеры с измерительными приборами, что обеспечивается за счет постоянства волнового сопротивления камеры значению 50 Ом. Для обеспечения корректности результатов проводимых измерений максимально допустимое отклонение волнового сопротивления линии составляет 0,5 Ом [26]. Как правило, согласование обеспечивают путем сохранения постоянства волнового сопротивления за счет пропорционального изменения радиусов опорного и активного проводников. Так, например, в [55] показано, что при линейном законе изменения радиусов соосных проводников коаксиальной камеры её КСВН $\leq 1,2$, тогда как при экспоненциальном изменении максимальное значение КСВН $\leq 1,1$ в диапазоне частот до 3 ГГц. Следовательно, экспоненциальная форма переходов камеры обеспечивает наилучшее согласование, что позволяет уменьшить влияние отражений от элементов конструкции камеры на результаты измерений.

1.4 Реверберационная камера

Устройство РК описано в военном стандарте MIL-STD 1377 [56] для измерения эффективности экранирования (ЭЭ) кабелей, входящих в состав РЭС специального назначения [57]. Типовая конструкция РК состоит из экранированного корпуса, внутри которого расположены передающая и приемная антенны, а также рассеивающий элемент (смеситель) (рисунок 1.8).

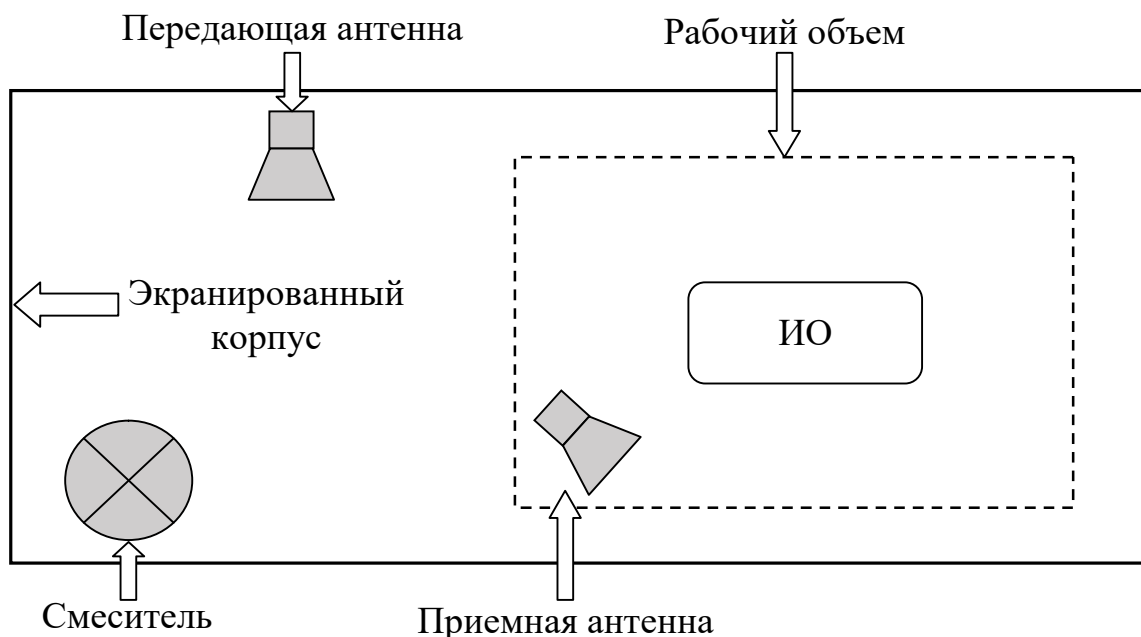


Рисунок 1.8 – Основные элементы конструкции РК

При подведении сигнала к передающей антенне внутри экранированного корпуса возбуждается ЭМП, которое представляет собой суперпозицию возбуждаемых типов волн (мод). В области низких частот (порядка сотен мегагерц) в РК возбуждается ограниченное число типов волн, суперпозиция которых не позволяет формировать ЭМП с требуемой однородностью, что объясняет существование нижней граничной частоты рабочего диапазона РК.

Частоты возбуждаемых типов волн внутри экранированного корпуса могут быть вычислены по выражению для прямоугольного резонатора:

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{H}\right)^2 + \left(\frac{p}{W}\right)^2}, \quad (1.16)$$

где L, H, W – длина, высота и ширина экранированного корпуса, m, n, p – целые положительные числа, c – скорость света.

Число возбуждаемых типов волн N может быть определено как [58]

$$N(f) = \frac{8\pi}{3} \cdot V \cdot \frac{f^3}{c^3} - (L + H + W) \cdot \frac{f}{c} + \frac{1}{2}, \quad (1.17)$$

где f – частота, V – объем корпуса.

Многokратное отражение подводимой ЭМВ от стен корпуса образует структуру стоячей волны с неравномерными по амплитуде областями. Традиционно для обеспечения однородного распределения ЭМП внутри РК прибегают к изменению пространственного положения смесителя, что приводит к изменению граничных условий РК. Таким образом, ЭМП в РК считается статистически однородным, если в пределах заданной погрешности усредненные по всем положениям смесителя значения пространственной ориентации и амплитуд напряженности одинаковы во всем рабочем объеме. Границы рабочего объема определяются расстоянием $\lambda / 4$ от стен корпуса, передающей антенны, смесителя [59]. При этом ИО будет подвергаться воздействию одного и того же ЭМП, независимо от его местоположения и ориентации внутри рабочего объема. Аналогично испытаниям на помехоустойчивость, при измерении помехоэмиссии принимаемая антенной мощность не будет зависеть от местоположения и ориентации ИО, что является ключевым преимуществом РК для воспроизводимости испытаний на ЭМС [60].

Методы перемешивания типов волн разделяют на две основные группы: механические и электрические. К первой группе относят методы, основанные на расположении во внутреннем объеме РК рассеивающих металлических конструкций, а также на использовании экранирующих корпусов особой формы. Во вторую группу входят методы, согласно которым изменение во времени граничных условий распространения ЭМВ внутри РК достигается с помощью электронных средств.

При проектировании РК широкое распространение получили смесители типа «Z-Fold» (рисунок 1.9 а). Конструкция смесителя разработана в 1997 г. компанией Lindgren RF совместно с Центром разработки надводного вооружения ВМС США для проведения испытаний коммерческой РЭА и систем вооружения согласно IEC 1000-4-3 [61] в диапазоне частот от 80 МГц. Особенностью данного вида смесителей является механическая прочность конструкции и минимальные требования к системе вращающих смесители двигателей. Определено, что ориентированные друг напротив друга два смесителя данного типа позволяют добиться более высокой равномерности распространения ЭМП в рабочем объеме камеры [30].

Смеситель типа «Bent-plates» представляет собой 8 одинаковых прямоугольных металлических лопастей, размещенных на 4 плечах (рисунок 1.9 б). Каждая панель может устанавливаться под любым углом относительно вертикали, что делает смеситель реконфигурируемым и позволяет вручную оптимизировать процесс перемешивания типов волн. Конструкция данного смесителя разработана на основе исследований [62] с использованием генетических алгоритмов. Оптимизируемая модель представляла собой конструкцию смесителя, в сферическом объеме вокруг которого размещены элементарные диполи и мониторы поля. В качестве целевой функции при оптимизации выбрано максимальное отклонение от среднего значения по амплитуде напряженности ЭМП, вычисленного в точках наблюдения поля в диапазоне частот 200–600 МГц. Параметрами оптимизации в исследовании являлись углы наклона металлических пластин, входящих в состав рассматриваемых конструкций смесителей. Определена оптимальная конструкция и выявлено, что линейное увеличение размеров смесителя увеличивает однородность поля в рабочем объеме, что может быть использовано при проектировании РК больших размеров. Также на основе исследований сделан вывод, что равномерное распределение ЭМП может быть получено при оптимальной траектории перемещения смесителя простой формы.

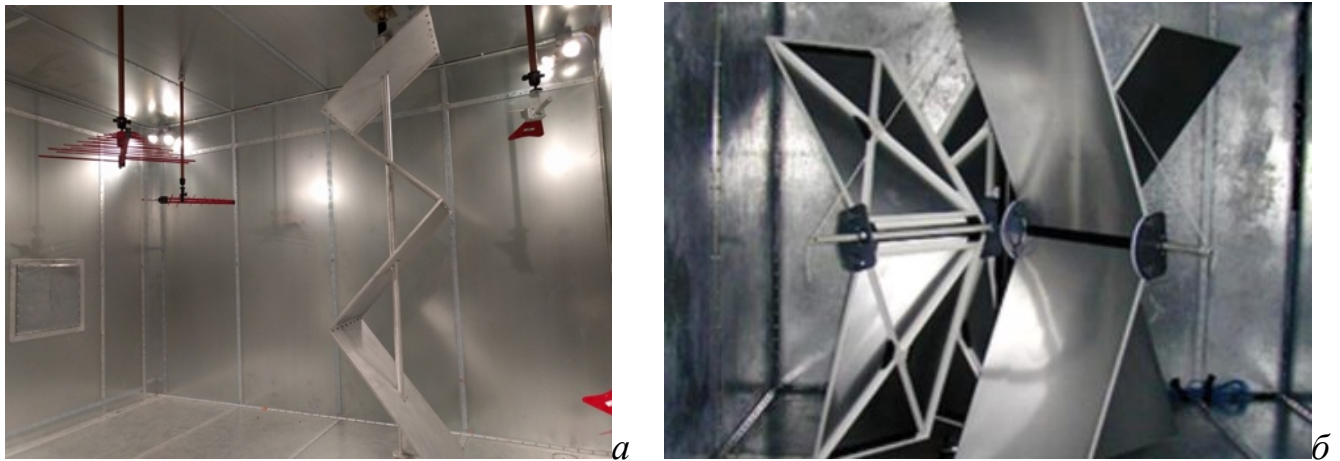


Рисунок 1.9 – Смесители «Z-fold» (а) и «Bend-plates» (б)

Конструкция нерегулярного реконфигурируемого смесителя [63] представляет собой расположенные на разных высотах дисковые платформы, на которых размещены прямоугольные металлические переотражатели ЭМВ (рисунок 1.10 а). В отличие от конструкций, разрабатываемых с применением алгоритмов оптимизации, данный тип смесителя является простым в изготовлении, что позволяет вносить изменения в конструкцию и гибко настраивать РК под определенные требования испытаний.

Известно, что увеличение размеров механического смесителя приводит к уменьшению отклонения напряженности ЭМП во внутреннем объеме РК [22], однако при этом уменьшается рабочий объем. На данный момент ведутся исследования по оптимизации внутреннего пространства РК и нахождению оптимального расположения отражающих элементов. Представлена конструкция РК, рабочий объем которой заключен в цилиндр, вокруг которого расположен массив из 8 Z-образных смесителей (рисунок 1.10 б) [64]. Оптимальное расположение смесителей было получено на основе строгого анализа резонансных типов волн и электродинамического моделирования. Показано, что при данном расположении смесителей существенно расширяется рабочий объем и увеличивается амплитуда напряженности электрического поля. Однако данный способ реализации РК усложняет механизм двигателей для управления положением смесителей и увеличивает общий вес камеры.

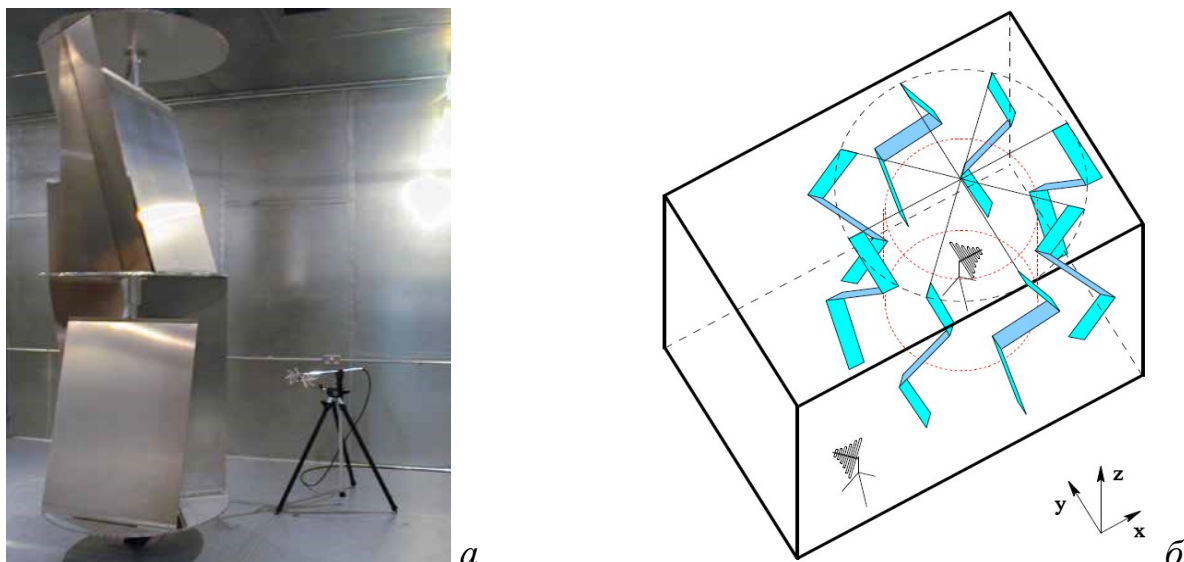


Рисунок 1.10 – Нерегулярный реконфигурируемый смеситель (а)
и РК с 8 Z-образными смесителями вокруг рабочего объема (б)

Для увеличения рабочего пространства РК применяют смесители настенного исполнения, которые представляют собой несколько рядов прямоугольных отражателей, соединенных между собой петлями. При помощи линейного двигателя конструкция смесителя приводится в движение, изменяя взаимную ориентацию рассеивающих элементов, и тем самым изменяя граничные условия распространения ЭМВ в РК (рисунок 1.11). Также возможно регулировать траекторию перемещения рассеивающих элементов, гибко настраивая РК под необходимые условия проведения испытаний [65].

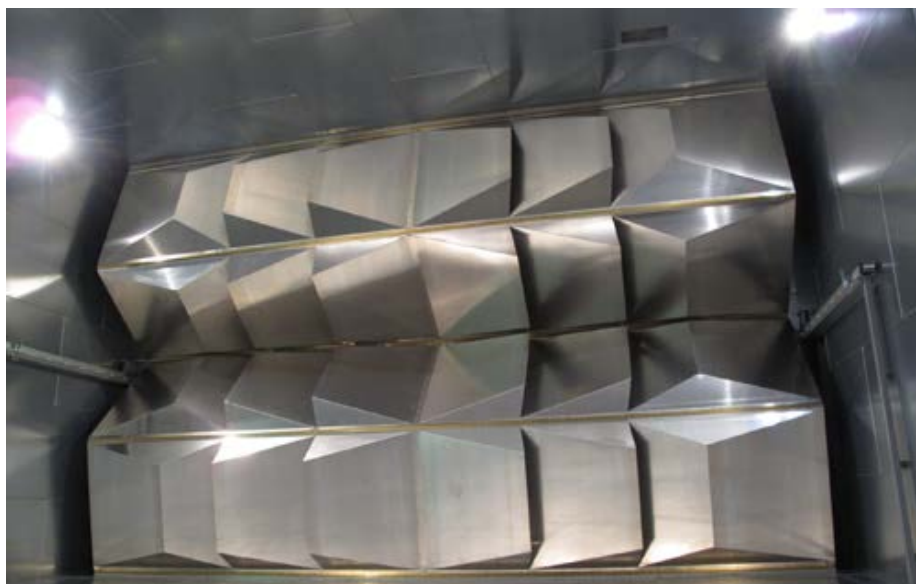


Рисунок 1.11 – Смеситель настенного исполнения

Помимо прямоугольных рассеивающих элементов, в РК применяются конструкции сложной формы. Прямоугольная форма смесителей приводит к появлению локальных неоднородностей ЭМП в рабочем объеме РК, однако использование смесителей в форме полусферы позволяет устранить данный недостаток, а также снизить нижнюю граничную частоту рабочего диапазона РК [66]. Преимущественно, в РК используется ступенчатое вращение смесителя вокруг собственной оси, однако недостаточно изучены спиральные траектории вращения, с помощью которых возможно получить большее число положений смесителя, при которых распределения ЭМП в РК будут некоррелированными [67].

В большинстве случаев при проектировании РК используют параллелепипедную форму экранированного корпуса, что объясняется удобством структуры для анализа и простотой сборки конструкции. Однако можно использовать поверхности кривой формы для увеличения средней плотности типов волн на низких частотах за счет их фокусирующих свойств, и, как следствие, снижать нижнюю граничную частоту рабочего диапазона. На основе этого в Национальной Физической лаборатории Великобритании разработан корпус РК с цилиндрическим основанием и полусферическими формами на вершинах, внутри которого находится рабочая зона (рисунок 1.12 *a*). Способ

создания реверберации является высокоэффективным, поскольку вся мощность подводимого сигнала рассеивается в энергию ЭМП внутри экранированного корпуса. В отличие от РК со смесителями в виде вращающихся металлических лопастей, данный механизм не приводит к уменьшению рабочего объема [68]. Эти преимущества также позволяют упростить анализ вероятностных характеристик ЭМП в рабочем объеме [69, 70]. Для данной формы корпуса показатель качества Q_c может быть вычислен как

$$Q_c = Q_0 \sqrt{\frac{f}{c} \left[1 + \zeta \frac{c}{f} \right]^{-1}}, \quad (1.18)$$

где ζ – переменная, зависящая от формы экранирующего корпуса РК (для сферической формы $\zeta = [9(4\pi/3)^{-1/3}/16] / R$), а Q_0 – может быть найдена как

$$Q_0 = (3/2)(V/S)\sqrt{\pi\mu\sigma}, \quad (1.19)$$

где S – площадь поперечного сечения, μ и σ – магнитная проницаемость и проводимость металла экранирующего корпуса.

Оценка нижней граничной частоты для предельного случая $f_{min} \geq \zeta c$ может быть представлена как

$$f_{min} \approx \left[\frac{16R\zeta}{3N_{BW}Q_0} \right]^2 c, \quad (1.20)$$

а для $f_{min} \leq \zeta c$:

$$f_{min} \approx \left[\frac{N_{BW} \cdot Q_0}{8\pi V} \right]^{2/5} c, \quad (1.21)$$

где N_{BW} – число типов волн, вносящих наибольший вклад в результирующее ЭМП.

На основе исследований по гибридизации акустической и электромагнитной РК, разработана РК на основе тканевого металлизированного материала (рисунок 1.12 б). В составе конструкции отсутствуют смесители, а эффект реверберации достигается за счет “встряхивания” гибких стен корпуса. Данная техника перемешивания типов волн создает значительный сдвиг

резонансных частот, за счет чего рабочий диапазон охватывает более низкие частоты по сравнению с жесткой конструкцией корпуса РК. Подобные РК широко применяются для испытаний аппаратуры, входящей в состав радиолокационных и спутниковых систем, а также летательных аппаратов. По аналогии разрабатываются РК, в которых изменение граничных условий обеспечивается за счет применения вибростенда в составе конструкции [71]. Для более точного аналитического описания статистических свойств ЭМП на разных частотах используют несколько видов функций распределения вероятностей. Данный подход апробирован на РК с тканевой основой при анализе компонент напряженности электрического поля в 5000 частотных точках, в диапазоне частот от 200 МГц до 4 ГГц. Выявлена сходимость статистических свойств измеренных данных с рассматриваемыми функциями распределения [72].



а



б

Рисунок 1.12 – РК сферической формы (а)
и на основе тканевого проводящего материала (б)

Возможность электрического перемешивания типов волн была обоснована в исследованиях РК с механическим перемешиванием, в которых рассмотрена модуляция входного сигнала для изменения граничных условий [73, 74]. Методы электронного перемешивания типов волн изначально разрабатывались для решения присущих механическим методам проблем, таких как большой

занимаемый объем смесителей внутри экранированного корпуса и необходимость применения мощных двигателей для их перемещения.

Если предполагать, что РК представляет собой эргодическую стационарную динамическую систему, то статистические свойства ЭМП в рабочем объеме камеры останутся неизменными, если для изменения граничных условий будет использовано изменение частоты входного воздействия. Частотный метод перемешивания типов волн заключается в использовании в качестве задающего воздействия частотно-модулированного сигнала. Первые исследования в данном направлении связаны с использованием гауссова импульса для возбуждения ЭМП в РК при проведении испытаний на помехоустойчивость. Формирование требуемого задающего воздействия с заданной длительностью выполнялось с помощью узкополосных фильтров. Основным преимуществом частотного метода перемешивания является формирование однородного ЭМП в реальном времени без ожидания полного цикла перемешивания и усреднения характеристик поля для их анализа. В ранних работах на примере [75] показано, что время, требуемое для проведения одного испытания в РК с частотным методом перемешивания, в 200 раз меньше по сравнению с временными затратами при испытании в РК с механическим перемешиванием. Оценка распределения ЭМП в РК с частотным перемешиванием типов волн может быть выполнена на основе анализа отклонения времени задержки распространяемого в РК сигнала вместо прямых измерений напряженности электрического поля. Систематический и случайный джиттер, выявляемый в принимаемом сигнале, дает достаточную информацию для анализа эффективности перемешивания типов волн. Кроме того, информация о фазе принятого сигнала используется для оценки когерентности и мгновенной энергии. Предложенный метод может быть использован для имитации ЭМП, возбуждаемых вследствие переходных процессов при задержке питания и отключении РЭС [76].

РК на низких частотах характеризуется конечным числом возбуждаемых типов волн, что в итоге приводит к неоднородному распределению ЭМП в

нижней области диапазона рабочих частот. Для уменьшения неоднородности разработан метод возбуждения РК с помощью нескольких антенн [77]. Перемешивание типов волн осуществляется с помощью многоэлементной антенной системы. Основная идея данного механизма возбуждения заключается в использовании когерентных задающих воздействий, не перекрывающихся по частоте. Однако применение данного подхода не приводит к росту однородности поля в рабочем объеме. Тем не менее, использование частично коррелированных сигналов для возбуждения ЭМП в РК позволяет добиться приемлемых характеристик формируемого поля [78]. Данный подход был апробирован в РК объемом 13 м^3 , в которой 5 конических монополярных антенн были размещены ортогонально вертикальным стенкам. За счет корреляции между задающими воздействиями отклонение напряженности поля в рабочем объеме не превышало 3 дБ на частотах от 100 МГц по сравнению с РК с металлическими смесителями, для которой данное условие соблюдается на частотах выше 400 МГц. Данный метод эффективен, когда амплитуда и фаза подводимых к антеннам сигналов управляются одновременно с помощью синхронизированных сигнальных модуляторов. Используемый в работе [79] подход позволяет учесть все взаимные связи между передающими антеннами и структурой РК посредством вычисления собственных и взаимных импедансов. Показано, что механизм перемешивания типов волн при помощи массива антенн применим для проведения испытаний в низкочастотной области (от 100 МГц).

Перемешивание типов волн за счет реактивно нагруженных антенн заключается в возбуждении ЭМП в РК несколькими реактивно-нагруженными антеннами [80]. Особенность метода заключается в том, что каждая антенна будет принимать часть энергии ЭМП из внутреннего объема РК, а затем повторно излучать её с дополнительной фазовой задержкой, тем самым имитируя перемещение стен корпуса и изменяя граничные условия распространения ЭМВ.

Перемешивание типов волн за счет изменения положения передающей антенны впервые было рассмотрено в работе [81] на примере возбуждения ЭМП в

РК с помощью вращающегося дипольного излучателя. Анализ статистических данных принятой антенной мощности в рабочем объеме производился на частотах 500 МГц и 1 ГГц. Полученные на основе измеренных данных кривые функции распределения удовлетворительно согласуются с идеализированными [82-84]. На основе строгого анализа возбуждаемых типов волн в РК наблюдалось, что с ростом числа вращаемых по линейной траектории излучателей увеличивается однородность ЭМП. По критерию согласования статистических характеристик измеряемого ЭМП с идеализированными функциями распределения предлагаемый подход не уступает механическому методу перемешивания, что говорит о возможности его применения при разработке РК [85, 86].

Метод с коммутационным перемешиванием ЭМВ в РК основан на изменении граничных условий без использования механических смесителей и массива антенн. На данный момент метод не получил экспериментального подтверждения своей эффективности, однако суть метода заключается в установке вместо смесителей нескольких металлических пластин разного размера на заданном расстоянии от внутренних стен корпуса камеры. При помощи электрического контакта между пластинами, который создается с помощью коммутационных переключателей, граничные условия внутри РК изменяются, а каждая комбинация соединенных с корпусом пластин соответствует определенному распределению поля в рабочем объеме. Таким образом, для РК с N пластинами общее количество некоррелированных распределений ЭМП составит $2N$ [57].

Оценка показателей качества работы РК выполняется при помощи метрики, основанной на статистическом анализе измеренных значений напряженности электрического поля. Для решения данной задачи РК принято рассматривать как эргодическую стационарную динамическую систему. Эргодическими системами в статистической физике принято называть стационарные динамические системы, у которых среднее значение ансамбля реализаций процесса в системе эквивалентно

усредненному значению ансамбля реализаций по времени. Таким образом, через достаточно долгое время каждая статистическая характеристика множества состояний процесса будет равномерно распределена по всему пространству системы. Данное предположение позволяет описать будущее состояние процесса без его точного математического описания. Результирующее ЭМП внутри РК может быть представлено как бесконечная сумма возбуждаемых типов волн, которые зависят от формы, размера, потерь и диэлектрических свойств экранирующего корпуса. В свою очередь, все типы возбуждаемых волн имеют собственный вклад в результирующее поле, которое определяется в зависимости от типа источника ЭМВ, ориентации и положения смесителей. Изменение положения приемной антенны, вращение смесителя или изменение частоты входного воздействия не влияют на распределение вероятностей, характеризующее результирующее распределение поля в РК.

Для оценки эффективности работы РК выделяют четыре группы показателей [87]:

1. Показатели однородности ЭМП – усредненные (по пространственному положению смесителей) значения напряженности ЭМП не должны отличаться более чем на 3 дБ в рабочем диапазоне частот. В идеализированном случае ЭМП в рабочем объеме считается однородным:

$$\langle |E_x|^2 \rangle = \langle |E_y|^2 \rangle = \langle |E_z|^2 \rangle = \frac{E_0^2}{3}, \quad (1.22)$$

где знак $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение по ансамблю реализаций для каждого положения смесителя, E_0 – постоянная величина напряженности ЭМП.

Коэффициент анизотропии $A_{\alpha\beta}$ и полный коэффициент анизотропии A_{tot} определяют равномерность поляризации. Они могут быть рассчитаны как

$$A_{tot} = \sqrt{\frac{A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2}{3}}, \quad (1.23)$$

$$A_{\alpha\beta} = \frac{\frac{|E_\alpha|^2}{P_i} - \frac{|E_\beta|^2}{P_i}}{\frac{|E_\alpha|^2}{P_i} + \frac{|E_\beta|^2}{P_i}}, \quad (1.24)$$

где α, β – индекс прямоугольной компоненты электрического поля для заданного положения смесителя, $|E_\alpha|$ и $|E_\beta|$ – измеренные компоненты напряженности электрического поля в заданной точке рабочего объема, P_i – мощность, подводимая к передающей антенне для заданного положения смесителя.

Коэффициент анизотропии $A_{\alpha\beta}$ можно рассматривать как нормализованное значение расстояния между двумя декартовыми компонентами поля. Граничные случаи, когда $A_{\alpha\beta} = +1$ или $A_{\alpha\beta} = -1$, характеризуют идеальную линейную поляризацию поля в плоскости $\alpha\beta$, а в случае $A_{\alpha\beta} = 0$ поле считается изотропным. Полный коэффициент анизотропии A_{tot} является общей метрикой, определяющей нормированное среднеквадратичное значение трех измеренных компонент поля. Поскольку значения величин $|E_\alpha|$ и $|E_\beta|$ заранее неизвестны, то коэффициенты анизотропии необходимо рассматривать как случайные величины с определенными функциями распределения в соответствии с этапом цикла перемешивания типов волн. Для удобства величины $A_{\alpha\beta}$ и A_{tot} определяются как функции усредненных значений поля. Усредненные коэффициенты анизотропии позволяют оценить производительность РК как функцию частоты. Пороговые уровни данных показателей для РК со «средним» (минус 5 дБ) и «качественным» (минус 10 дБ) перемешиванием типов волн с обоснованием данных величин представлены в работе [88].

Коэффициенты неоднородности поля аналогичны коэффициентам анизотропии и определяются как

$$I_{tot} = \sqrt{\frac{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}{3}}, \quad (1.25)$$

$$I_{\alpha}(r_1, r_2) = \frac{\frac{|E_{\alpha}(r_1)|^2}{P_i} - \frac{|E_{\alpha}(r_2)|^2}{P_i}}{\frac{|E_{\alpha}(r_1)|^2}{P_i} + \frac{|E_{\alpha}(r_2)|^2}{P_i}}, \quad (1.26)$$

где r_1 и r_2 – точки расположения датчиков поля, $I_{\alpha}(r_1, r_2)$ и I_{tot} – коэффициенты неоднородности поля.

Наиболее известная метрика оценки однородности поля представлена в руководстве к стандарту Европейского космического агентства ECSS [89], согласно которому однородность поля определяется с помощью прямых измерений напряженности поля в восьми точках, определяющих границы рабочего объема. Датчики напряженности электрического поля должны быть расположены на расстоянии не менее $\lambda_{нзр} / 2$ ($\lambda_{нзр}$ – нижняя граничная длина волны РК) от стен корпуса, смесителей и антенн. Измерения должны быть проведены не менее чем на 45 частотах, разнесенных в логарифмическом масштабе. Минимальное количество пространственных положений смесителя должно составлять не менее 10. Изначально определяется максимум амплитуды каждой составляющей напряженности электрического поля, возникающей при полном вращении смесителя ($\varphi_j = \varphi_1, \dots, \varphi_N$), после чего данная величина нормируется на среднюю подводимую к РК мощность P_i :

$$\tilde{E}_{\alpha,i} = \frac{\max_{\varphi_j = \varphi_1, \dots, \varphi_N} |E_{\alpha}(r_i)|_{\varphi_j}}{\sqrt{P_i}}, \quad (1.27)$$

где α – индекс компоненты напряженности электрического поля в декартовой системе координат, j – положение смесителя, $i = 1, \dots, 8$ – номер датчика.

Отклонение между измеренными значениями рассчитывается для отдельных компонент $\langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle$ и абсолютной величины напряженности электрического поля $\langle \tilde{E}_{total} \rangle$ по выражениям:

$$\langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{\alpha,i}, \quad (1.28)$$

$$\langle \tilde{E}_{total} \rangle = \frac{1}{24} \sum_{\alpha=\{x,y,z\}} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{\alpha,i}. \quad (1.29)$$

Среднеквадратическое отклонение для прямоугольных составляющих σ_{α} и абсолютного значения σ_{total} напряженности электрического поля в рабочем объеме определяются как

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle)^2}{8-1}}, \quad (1.30)$$

$$\sigma_{total} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=\{x,y,z\}} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle)^2}{24-1}}. \quad (1.31)$$

Значение девиации $\sigma_{\xi_{dB}}$, выраженной в децибелах, находится как

$$\sigma_{\alpha_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{\sigma_{\alpha} + \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle}{\langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle}, \quad (1.32)$$

При анализе распределения ЭМП также оцениваются основные показатели РК, такие как минимальная рабочая частота, вносимые потери, максимально допустимые габариты ИО.

Обобщенный показатель качества РК Q характеризует зависимость амплитуды напряженности возбуждаемых электрической и магнитной составляющих ЭМП от подводимой к РК мощности. Однако расчет данного показателя для большого числа типов волн нецелесообразен, поэтому на практике используется базовое определение Q , которое в 2 раза превышает отношение энергии, накопленной за цикл перемешивания, к энергии, рассеиваемой за цикл:

$$Q = \frac{\omega \cdot \varepsilon \cdot \bar{E}^2 \cdot V}{2P} = \frac{\omega \cdot \bar{B}^2 \cdot V}{2\mu P}, \quad (1.33)$$

где V – рабочий объем, P – подводимая мощность, ω – циклическая частота.

Для одномерного случая данный показатель может быть увеличен в 3 раза для учета энергии остальных двух составляющих ЭМП, а также выражен через среднеквадратическое отклонение напряженности электрического поля σ^2 :

$$Q = \frac{3 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \sigma^2 \cdot V}{P}, \quad (1.34)$$

Известно, что величина Q распределена по закону Фишера-Снедекора (F -распределение) [90]. При заданном рабочем объеме среднее арифметическое значение величины Q (в отличие от среднего гармонического) проявляется в явную асимптотическую зависимость от геометрических размеров РК. В асимптотическом высокочастотном пределе обратная зависимость величины Q от частоты определяется дисбалансом между коэффициентами качества для TM - и TE -типов волн, а также соотношениями размеров РК [91].

В качестве дополнительного показателя эффективности РК можно использовать волновое сопротивление РК, которое определяется на основе статистических свойств напряженности электрического и магнитного полей. Данная метрика может быть использована для проведения аналогии с испытательными устройствами, принцип работы которых основан на распространении квази-поперечных волн ($TEM/GTEM$ -камеры, полосковые линии) [92].

2. Статистические показатели. Характеристики ЭМП внутри РК считаются случайными величинами, характеризующимися собственными функциями распределения вероятности. Усредненная выборка напряженности поля в каждой точке рабочего объема должна соответствовать ожидаемому распределению. В идеализированном случае все статистические параметры ЭМП являются постоянными величинами. Детальная оценка статистических свойств измеренных значений производится путем сравнения гистограммы распределения с предполагаемым идеальным распределением данных параметров.

3. Показатель подобия ЭМП – распределение ЭМП в рабочем объеме для каждого пространственного положения смесителя должно в значительной мере отличаться. Пространственное распределение ЭМП в РК для фиксированного положения смесителя представляет собой сложную модальную структуру, представляющую собой суперпозицию конечного числа резонансных типов волн,

а при изменении граничных условий РК структура ЭМП изменяется. Изменение структуры поля при изменении граничных условий является качественным показателем РК. Анализ подобия ЭМП выполняется с использованием автокорреляционной функции, которая показывает, насколько N измерений в одной точке рабочего объема схожи с N измерениями в другой точке. Автокорреляционная функция находится как

$$\rho(r) = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)(x_{i+r} - \langle x \rangle)}{s_x^2}, \quad (1.35)$$

где N – число положений смесителя; x_1, x_2, \dots, x_N – последовательность измеренных значений компоненты ЭМП; $\langle x \rangle$ – усредненное значение, s_x^2 – дисперсия измеренной компоненты.

Случай, когда $|\rho| = 1$, соответствует строгой автокорреляции оцениваемой величины, а при $|\rho| \approx 0$ автокорреляция оцениваемой величины отсутствует. На практике достаточно сложно добиться отсутствия автокорреляции даже для некоррелируемых данных. В руководстве [49] указано, что при $|\rho| < 0,37$ ЭМП считается некоррелированным, однако в работе [93] предложен более высокий порог для оценки корреляционных характеристик ЭМП в РК. На практике достаточно сложно оценить подобие ЭМП с помощью автокорреляционной функции ввиду большого числа исходных данных, в связи с этим применяется автокорреляционная функция с единичным сдвигом.

4. Показатель диффузии поля. Множественные отражения ЭМВ внутри РК создают «диффузное» поле. Сигналы, распространяющиеся при таком распределении, характеризуются длительными временными задержками и узкой полосой частот, в которой проявляется их когерентность. Понятие диффузного поля тесно связано с понятием однородности поля, в котором отсутствует определенное направление распространения ЭМВ в рабочем объеме. В исследованиях, связанных с применением РК для анализа систем связи и имитации многолучевого канала распространения радиоволн, предлагается ряд

показателей эффективности для РК как источника диффузного поля. В реальных условиях распространения радиоволн, в которых работает беспроводная связь, многолучевой канал распространения представляет собой комбинацию прямого и побочного распространения радиоволн. Большинство показателей диффузии ЭМП в РК основывается на модели стационарного некоррелированного рассеяния (рисунок 1.13), которая используется для исследования систем беспроводной связи.

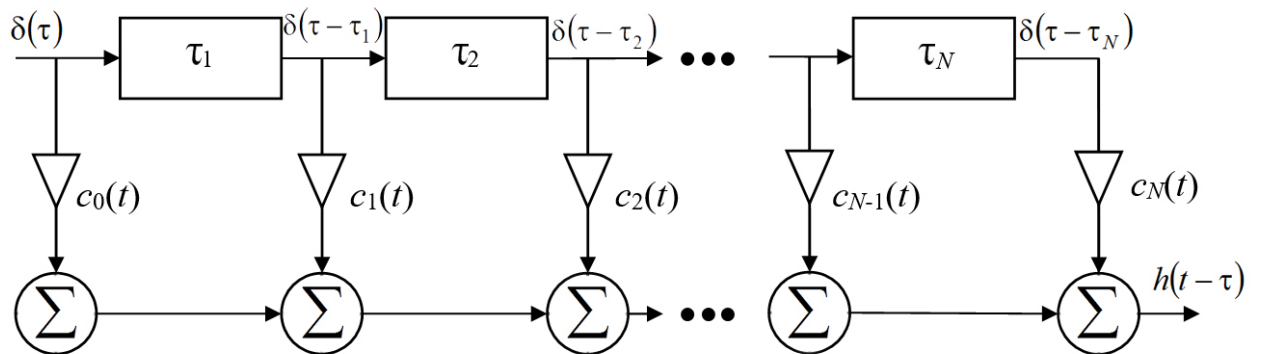


Рисунок 1.13 – Модель стационарного некоррелированного рассеяния с линиями задержки для стохастического канала связи

В приведенной модели (рисунок 1.13) функция $h(t, \tau)$ представляет собой дискретно-временную импульсную характеристику канала распространения радиоволн. Коэффициенты $c_i(t)$ описывают изменение амплитуды и фазы i -го отражения входного импульса. Таким образом, импульсную характеристику можно записать как

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^N c_i(t) \delta(\tau - \tau_i). \quad (1.36)$$

Импульсная характеристика обычно определяется для n -го состояния перемешивания типов волн и определяется как результат обратного преобразования Фурье коэффициента передачи S_{21} между передающей и приемной антеннами как

$$h_n(t) = ОПФ(S_{21_n}(f)). \quad (1.37)$$

При испытаниях систем связи стандарта GSM РК применяется для имитации канала распространения радиоволн вне прямой видимости. За счет использования ряда механических смесителей совместно с внесением радиопоглощающего материала внутрь экранирующего корпуса РК возможна имитация канала распространения с различной вероятностью битовой ошибки (от $8,015 \cdot 10^{-4}$ до $1,215 \cdot 10^{-2}$) [94]. На примере имитации канала распространения сигналов с OFDM- и CDMA-модуляцией показано, что при возбуждении РК узкополосным сигналом возникают неустраняемые ошибки в принимаемом сигнале в процессе вращения смесителя, а использование для данной цели широкополосного сигнала приводит к малым изменениям средней принимаемой мощности и средней напряженности электрического поля во внутреннем объеме РК [95, 96].

В таблице 1.2 приведены основные измеряемые в РК величины и представлены их эмпирически определенные функции распределения вероятности.

Таблица 1.2 – Функции распределения вероятности величин, подлежащие измерению при определении показателей качества РК

Величины	Описание	Функция распределения вероятности
$E_{\alpha}^{\parallel}, E_{\alpha}^{\perp}, H_{\alpha}^{\parallel}, H_{\alpha}^{\perp}$	Синфазная (\parallel) и квадратурная (\perp) составляющие ($\alpha = x, y, z$) E или H -поля	Нормальное распределение (распределение Гаусса)
$ E_{\alpha} $ $ H_{\alpha} $	Составляющая напряженности E или H -поля	Хи-распределение с двумя степенями свободы (распределение Рэлея)
$\angle E_{\alpha}$ $\angle H_{\alpha}$	Составляющая фазы E или H -поля	Равномерное распределение в диапазоне $[0, 2\pi)$
$ E_{\alpha} ^2$ $ H_{\alpha} ^2$	Составляющая плотности энергии E или H -поля	Распределение Хи-квадрат с двумя степенями свободы (экспоненциальное распределение)
$ E $ $ H $	Полная амплитуда E или H -поля	Хи-распределение с шестью степенями свободы
$ E ^2$ $ H ^2$	Полная плотность энергии E или H -поля	Хи-распределение с шестью степенями свободы
Q	Обобщенный показатель качества	Распределение Фишера-Снедекора (F -

		распределение) с шестью и четырьмя степенями свободы
Z^{\parallel} Z^{\perp}	Синфазное \parallel и квадратурное \perp волновые сопротивления	Распределение Пирсона VII-типа
$\angle Z$	Фаза волнового сопротивления	Равномерное распределение в диапазоне $[0, 2\pi)$
$ Z $	Абсолютное значение волнового сопротивления	Лог-логистическое распределение

Современные РК разрабатываются с использованием аналитических моделей и численных методов, с помощью которых возможно оценить основные показатели качества работы на этапе проектирования. Суперпозиция ряда плоских ЭМВ со случайным направлением распространения позволяет симитировать стохастически однородное ЭМП в РК. Использование конечного ряда плоских ЭМВ, отобранных на основе теории спектральных выборок, позволяет ускорить процесс численного анализа и эффективно вычислять токи, наводимые на ИО [97, 98]. На основе данного подхода разработана модель РК, ЭМП в которой представляется как суперпозиция 100 плоских ЭМВ, а численное интегрирование для получения результирующего ЭМП выполнено методом Монте-Карло [99]. Для предварительного анализа РК применяются грубые модели, которые используются для оценки уровней воздействия на ИО в рабочем объеме и сравнения с результатами численного анализа, выполненного на основе других математических методов [100]. При моделировании учет влияния смесителей на распределение ЭМП приводит к увеличению скорости сходимости результатов, а для дискретизации модели целесообразно применять полиномы второго порядка [101]. Разрабатываемые модели позволяют проводить анализ конструкции РК как во временной, так и в частотной областях [102], а также с учетом потерь на излучение и отражение ЭМВ [103].

Точная оценка нижней граничной частоты рабочего диапазона РК может быть выполнена на основе совместного анализа нескольких показателей качества, основанных на энергетических характеристиках и напряженности электрического поля, а также определения соответствия измеренных показателей априорному закону распределения [104, 105]. В работах [106-109] исследуется метод

выявления локальных областей с высокой неоднородностью напряженности ЭМП на основе представления ЭМП в РК как суперпозиции ряда плоских ЭМВ, предполагая эргодичность первых двух моментов амплитуды углового спектра. Вычисление максимального значения амплитуды напряженности электрического поля выполняется исходя из его среднеквадратичного значения и обратного коэффициента вариации функции распределения амплитуды рассматриваемой выборки измеренных данных.

Учитывая особенности конструкции и распределения ЭМП, методы испытаний на ЭМС с применением РК также обладают рядом отличий от других испытательных устройств. При испытаниях на помехоустойчивость воздействующее на ИО ЭМП не зависит от диаграммы направленности передающей антенны [110]. Мощность, рассеиваемая передающей антенной, вдвое превышает мощность, рассеиваемую в той же самой антенне в режиме приема [111]. Также стоит отметить, что оценка излучаемой ИО мощности не может быть выполнена точно без априорных данных о поляризационных свойствах и амплитуде формируемого ЭМП [112]. Изначально РК использовались для испытаний на помехоустойчивость благодаря возможности формировать ЭМП высокой напряженности, однако доказано, что РК является взаимным устройством, что может быть использовано для проведения испытаний на помехоэмиссию [113]. Экспериментально данное предположение было подтверждено на основе измерений ЭМП от микрополосковых линий в диапазоне частот от 200 МГц до 2 ГГц, которые согласуются с результатами теоретического анализа. В то же время в работе [114] показано, что возможно измерение эмиссии сложных ПП в широком диапазоне частот. Испытания на помехоэмиссию также могут проводиться во временной области в отличие от классического подхода со свипированием по частоте. При таком подходе к измерению не требуется предварительная калибровка РК перед проведением испытаний, а усреднение принятой антенной мощности в процессе перемешивания типов волн может быть выполнено с помощью анализатора спектра [115].

Помимо испытаний на ЭМС, РК широко применяются для оценки экранирующих свойств корпусов блоков РЭС. В стандарте [61] описана процедура измерения ЭЭ с использованием РК на основе метода вложенных камер. Исследуемый корпус с расположенными внутри смесителями помещают в рабочий объем РК и проводят сравнение усредненных значений напряженности электрического поля с экраном и без экрана для определения количественной меры затухания поля внутри корпуса. Предложенный метод измерения применим только для крупногабаритных корпусов с размерами более 2 метров, поскольку в корпусах с малыми размерами отсутствует место для расположения смесителей и антенн. Данная методика была модифицирована с учетом размеров вложенного корпуса и апертуры, что позволило получить более точные оценки ЭЭ корпусом [116]. Для упрощения процедуры измерения ЭЭ крупногабаритных корпусов, применяемых в электронной промышленности, используются методы измерения ЭЭ во временной области с помощью двух антенн. Предлагаемые измерения во временной области позволяют значительно сократить время испытания, однако для получения точных результатов необходимо использовать антенны с высоким коэффициентом полезного действия [117]. Измерение ЭЭ малогабаритных корпусов выполняется посредством измерения напряженности электрического поля монополюсом в трех точках объема внутри корпуса [118]. Выявлено, что полученные значения ЭЭ зависят от пространственной ориентации приемного монополя внутри корпуса как в области низких, так и высоких частот. Для решения данной неоднозначности применяется метод многоточечного отбора, согласно которому на основе измеренных напряженностей электрического поля в ряде точек пространства корпуса рассчитываются среднее и минимальное значения ЭЭ корпусом [119]. По сравнению с методом пробных испытаний [120], измерения на основе предлагаемого метода являются повторяемыми и позволяют получить больше данных о распределении ЭМП внутри исследуемого экрана. В работе [121] предложена конструкция проводной антенны для измерения ЭЭ исследуемого корпуса. Конструкцию антенны располагают внутри исследуемого

экранирующего корпуса, что позволяет более точно оценить ЭЭ в широком диапазоне частот. С помощью РК также возможно измерение ЭЭ планарных образцов материалов, устанавливаемых в апертуру пустотелого прямоугольного экранирующего корпуса. Для упрощения процедуры измерения ЭЭ планарных материалов вместо корпуса также используются ТЕМ-камеры [122, 123]. Для оценки ЭЭ различных коаксиальных кабелей разработана методика на основе численных методов, которая заключается в суммировании плоских ЭМВ со случайными параметрами в частотной области и вычислении тока, индуцированного в экран кабеля, с помощью метода конечных разностей во временной области [124]. По найденному току в экране определяется напряжение на нагрузке кабеля, которое сравнивается с усредненным значением напряжения на нагрузке для каждого положения механического смесителя. Выполнено сравнение результатов численного анализа и эксперимента, которое выявило удовлетворительную сходимость. Также с помощью РК проводят измерения среднего коэффициента поглощения объектов произвольной формы [125]. Оценка коэффициента поглощения основана на сравнении значений эффективного сечения поглощения ИО и радиопоглощающего материала той же формы. Данный метод применим для численного моделирования, посредством которого возможно формирование материала поглотителя произвольной формы. Оценка эффективного сечения поглощения объектов с потерями также может быть выполнена на основе измерения мощности, рассеиваемой ИО при падении плоской ЭМВ [126]. РК используется в данном случае как источник плоской ЭМВ, а среднее значение эффективного сечения поглощения определяется за счет изменения направления распространения ЭМВ путем изменения граничных условий РК. Представленные математические модели на основе предложенного метода для определения эффективного сечения поглощения сферы и цилиндра показывают удовлетворительную сходимость с результатами эксперимента. Также показано, что объекты, расположенные близко друг к другу, могут иметь эффективное сечение поглощения, отличное от суммы отдельных поперечных

сечений для каждого объекта. Также РК применяются для проведения биомедицинских исследований [127-131]. Например, в работе [132] выполнен численный анализ удельной мощности поглощения биологическими объектами в РК с помощью метода моментов, метода конечных разностей во временной области и гибридного метода. Показано, что для оценки среднего коэффициента поглощения определенного органа животного целесообразно использование гибридного метода ввиду меньших затрат на вычислительные ресурсы.

1.5 Цель и задачи исследования

Из выполненного в п. 1.1 обзора следует, что повышение степени интеграции ИС, снижение уровня питающих напряжений и увеличение плотности монтажа ЭКБ, позволяют существенно уменьшить массу и габариты современных РЭС. Активное развитие технологий производства, в том числе таких решений, как «система-на-кристалле», рост частот используемых в ИС сигналов приводят к увеличению помехоэмиссии и восприимчивости РЭС к ЭМП, что обостряет задачу обеспечения ЭМС на разных этапах проектирования и разработки РЭС.

Из п. 1.2 следует, что для измерения уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости ИС и малогабаритных РЭС в целом, широкое применение получили методы испытаний в ТЕМ-камере. Диапазон рабочих частот для промышленных устройств согласно нормативным документам [17, 18] не превышает 1 ГГц, при этом для научных исследований разрабатываются экспериментальные устройства, диапазон рабочих частот которых не превышает 3-4,5 ГГц [41, 44], а современные РЭС работают на более высоких частотах, в связи с чем требуется совершенствование ТЕМ-камер для проведения испытаний в более широком диапазоне частот и амплитуд воздействий.

Из п. 1.3 следует, что для решения задач электромагнитного экранирования широко используются композитные материалы, представляющие собой полимеры с комплексом улучшенных физико-химических свойств. При этом применение подобных материалов в составе экранирующих конструкций позволяет значительно снизить массу, повысить надежность и отказоустойчивость РЭС, в

том числе и в сфере космического приборостроения. Одним из основных параметров при определении экранирующих свойств материалов является ЭЭ, измерение которой может быть выполнено в устройствах на основе линий передачи в виде коаксиальных камер без использования безэховой камеры. Представленные в [49, 50] образцы таких устройств работают в диапазоне частот от 20 МГц до 3 ГГц, что ограничивает проведение современных исследований и требует совершенствования коаксиальных камер, в частности, расширения диапазона рабочих частот.

Из п. 1.4 следует, что испытания РЭС на устойчивость к ЭМП с высокой напряженностью поля проводятся в электромагнитных РК, разработка которых основана на применении численных методов, позволяющих оценить основные показатели качества РК на этапе проектирования. В то же время, использование численных методов требует значительных вычислительных затрат ввиду больших размеров анализируемой структуры. В связи с этим, на начальном этапе проектирования целесообразно получение быстрых оценок распределения ЭМП в рабочей зоне РК.

Цель работы – усовершенствовать камеры для испытаний радиоэлектронных средств на ЭМС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать усовершенствованную ТЕМ-камеру, пригодную для проведения испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС.
2. Разработать усовершенствованную коаксиальную камеру, пригодную для измерения ЭЭ образцов планарных композитных материалов.
3. Разработать и программно реализовать математическую модель для приближенной оценки распределения амплитуд напряженности электрического поля в эффективной рабочей зоне под испытываемый объект реверберационной камеры.

2. ТЕМ-КАМЕРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В данном разделе представлены результаты разработки усовершенствованной ТЕМ-камеры для проведения испытаний ИС на помехоэмиссию и помехоустойчивость:

– выполнена разработка электродинамической модели ТЕМ-камеры на основе анализа различных конструкций согласующих переходов с применением аналитических расчетов, квазистатического [133–136] и электродинамического моделирования [137];

– выполнена параметрическая оптимизация электродинамической модели с согласующим переходом [138, 139];

– выполнена разработка твердотельной модели ТЕМ-камеры, изготовлен лабораторный макет и выполнено его измерение;

– представлены результаты применения усовершенствованной ТЕМ-камеры для измерения помехоэмиссии от ИС отечественного производства.

2.1 Аналитический и квазистатический расчеты геометрических параметров

Согласно стандартам МЭК по измерению помехоэмиссии [17] и помехоустойчивости [18], испытываемая ИС устанавливается на четырехслойной ПП с размерами $100 \times 100 \text{ мм}^2$ со сплошным полигоном земли (металлизацией) шириной 10 мм на краях платы для обеспечения электрического контакта с корпусом ТЕМ-камеры.

Согласно экспериментальным оценкам [140], высота ИО должна составлять не более $1/3$ от расстояния между основанием камеры и центральным проводником. Данное условие является необходимым для уменьшения неравномерности распределения ЭМП, которое возникает при помещении ИО внутрь камеры. Толщина центрального проводника t выбрана равной 1 мм. На основе представленных в таблице 1.1 геометрических параметров корпусов серийно выпускаемых ИС, высота ИО выбрана равной $y_1 = 5 \text{ мм}$, тогда получим расстояние между основанием и проводником $d = 15 \text{ мм}$, а при толщине

центрального проводника $t = 1$ мм высота регулярной части корпуса составит $b = 31$ мм (рисунок 2.1).

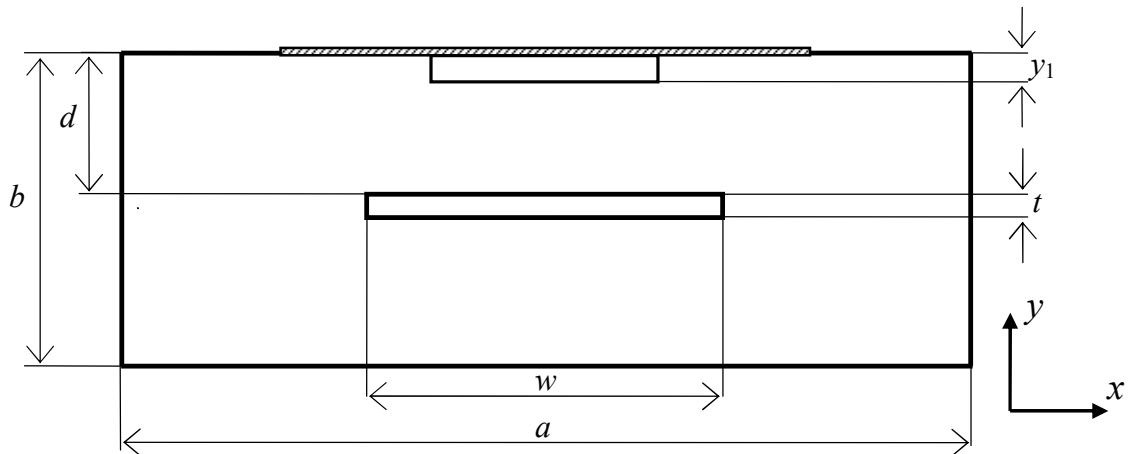


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение ТЕМ-камеры с размещенной сверху ПП с ИС

На основе заданных размеров, согласно выражениям (1.2)-(1.4), 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 (рисунок 2.2).

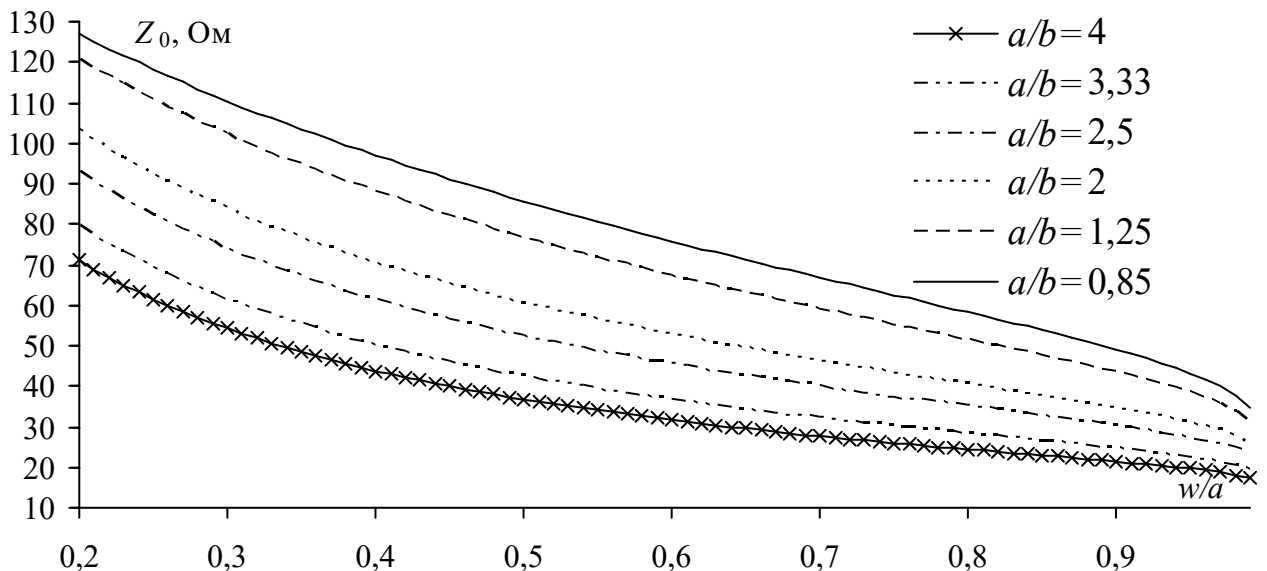


Рисунок 2.2 – Зависимости волнового сопротивления Z_0 от соотношения w/a при разных a/b

С помощью представленных на рисунке 2.2 зависимостей, с учетом требований к волновому сопротивлению $Z_0 = 50$ Ом, а также с учетом размеров

испытательной ПП и размещения ИС с максимальной длиной и шириной 30×30 мм (таблица 1.1) во внутреннем пространстве камеры, размеры ширины центрального проводника w и корпуса a выбраны исходя из соотношений $a/b = 3,33$; $w/a = 0,4$; $a = 100$ мм; $w = 40$ мм.

Выполнено построение геометрической модели регулярной части TEM-камеры на основе полученных размеров в системе TALGAT [133–136] (рисунок 2.3) и вычислено значение волнового сопротивления: $Z_0 = 50,26$ Ом.

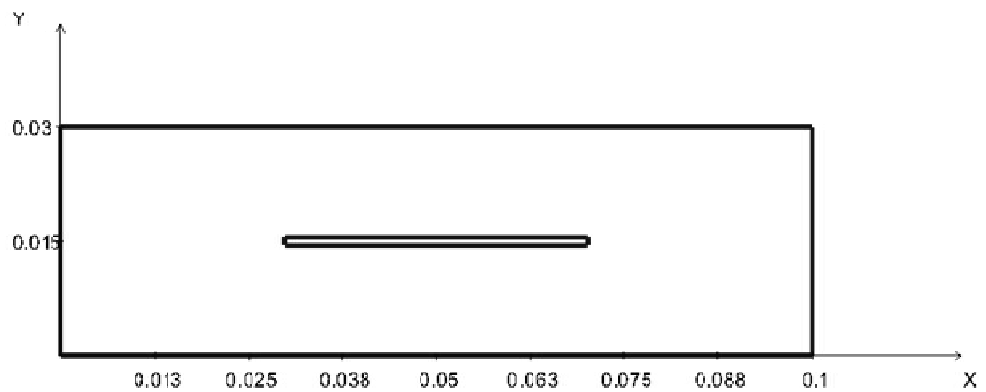


Рисунок 2.3 – Геометрическая модель регулярной части TEM-камеры в системе TALGAT

2.2 Электродинамический анализ

Выполнены разработка и анализ электродинамической модели регулярной части камеры длиной $L = 100$ мм (рисунок 1.3). Разработка модели выполнена на основе полученных геометрических параметров при помощи аналитического вычисления и квазистатического моделирования. На рисунке 2.4 приведена вычисленная частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$. Видно, что значение $|S_{11}|$ не превышает минус 55 дБ в диапазоне частот до 6 ГГц, что говорит о согласовании регулярной части камеры с трактом 50 Ом.

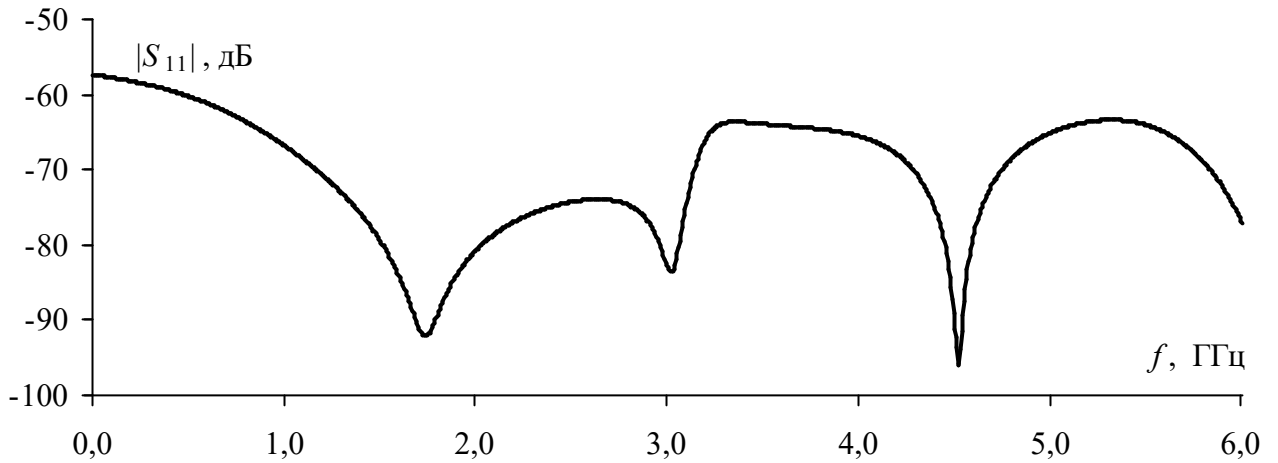


Рисунок 2.4 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ регулярной части ТЕМ камеры

Для согласования регулярной части ТЕМ-камеры с волновым сопротивлением коаксиального соединителя рассмотрены различные формы коаксиально-полосковых переходов. Изначально выполнен анализ классической конструкции ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами [141]. Геометрические размеры всех элементов конструкции камеры (рисунок 2.5 а) выбраны исходя из экспериментальных оценок и аналитических выражений из [141, 142]. Таким образом, получена длина пирамидального перехода $L_3 = 50$ мм (рисунок 2.5 б), а высота корпуса в месте расположения коаксиальных соединителей камеры выбрана равной $b_1 = 4,5$ мм. Выбор данного размера объясняется подключением к модели камеры, модели коаксиального соединителя типа SMA с диаметрами диэлектрика и центрального проводника, равными 4,1 мм и 1,28 мм соответственно (материал диэлектрика – тефлон, $\epsilon_r = 2,1$). Ширина корпуса a_1 и центрального проводника w_1 в месте подключения соединителя типа SMA выбраны исходя из требований обеспечения волнового сопротивления 50 Ом, при соотношении $a/b = a_1/b_1$: $a_1 = 15$ мм, $w_1 = 3,9$ мм. Без использования дополнительных конструктивных изменений $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами составил менее минус 20 дБ в полосе частот до 4,75 ГГц. Резонансная частота камеры, после которой возбуждаются высшие типы волн, составила 5 ГГц. Из рисунка 2.6 а виден резонанс зависимости $|S_{11}|$ на частоте 5 ГГц, определяемый длиной и шириной регулярной части корпуса.

ТЕМ-камера с корпусом прямоугольной формы является наиболее простой из рассмотренных конструкций (рисунок 2.5 в). Размеры внутреннего объема корпуса, внутри которого располагается центральный проводник, составляют $100 \times 100 \times 30$ мм³. Угол сужения ширины центрального проводника α выбран с помощью метода доверительных областей [143]. В качестве минимизируемой целевой функции оптимизации выбрано максимальное значение коэффициента отражения $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 5 ГГц. По результатам оптимизации получено значение угла сужения $\alpha = 19,4$ (рисунок 2.5 з). При этом до частоты 4,8 ГГц коэффициент отражения $|S_{11}|$ не превышает уровня минус 28 дБ (рисунок 2.6 б), что приемлемо для испытаний согласно стандартам по измерению помехоэмиссии [17] и стойкости ИС к электромагнитным помехам [18].

Для расширения полосы рабочих частот рассмотрена ТЕМ-камера с сужающимися согласующими переходами при их неизменной высоте (рисунок 2.5 д) [138]. Уменьшение ширины корпуса выполнено под линейным углом α с прямоугольным выступом на конце сужения, внутри которого выполнено круглое отверстие для коаксиального соединителя, центральный проводник которого замыкается на центральной пластине камеры. 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 коаксиальным соединителем, а также с округлением углов радиусами R_1 и R_2 соответственно (рисунок 2.5 е). Параметрическая оптимизация данной модели выполнена аналогично оптимизации ТЕМ-камеры с прямоугольным корпусом. В результате получены следующие значения: $\alpha = 11,9^\circ$, $\alpha_1 = 31,8^\circ$, $\alpha_2 = 136,7^\circ$, $L_1 = 12,6$ мм, $R_1 = 2,45$ мм, $R_2 = 1$ мм. При этом $|S_{11}|$ не превышает уровень минус 30 дБ в полосе частот до 5,2 ГГц (рисунок 2.6 в).

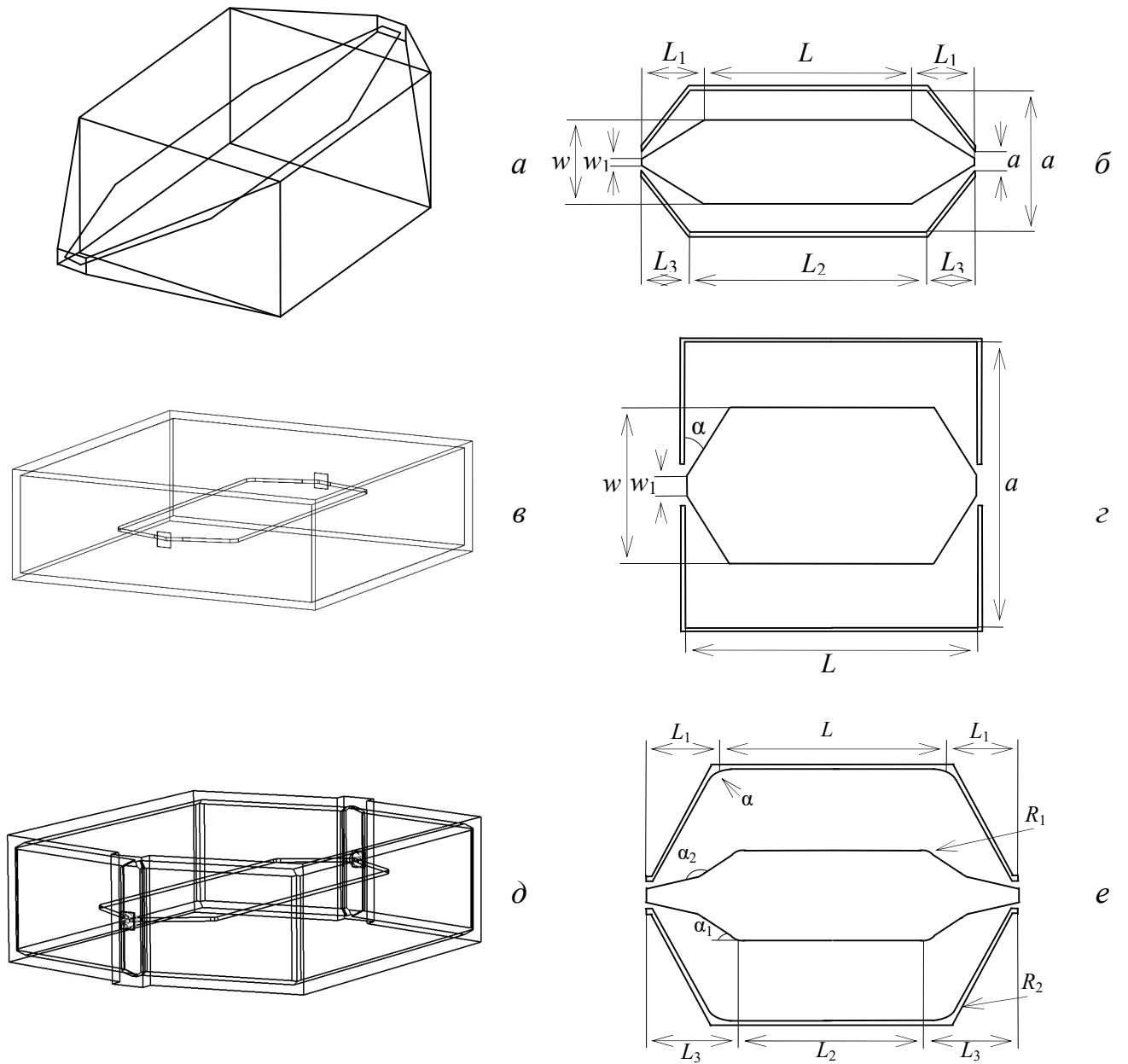


Рисунок 2.5 – Изометрические виды и продольные сечения сверху для геометрических моделей ТЕМ-камер с пирамидальными переходами (a , b), прямоугольным корпусом (v , z) и сужающимися переходами (d , e) при постоянной высоте корпуса, соответственно

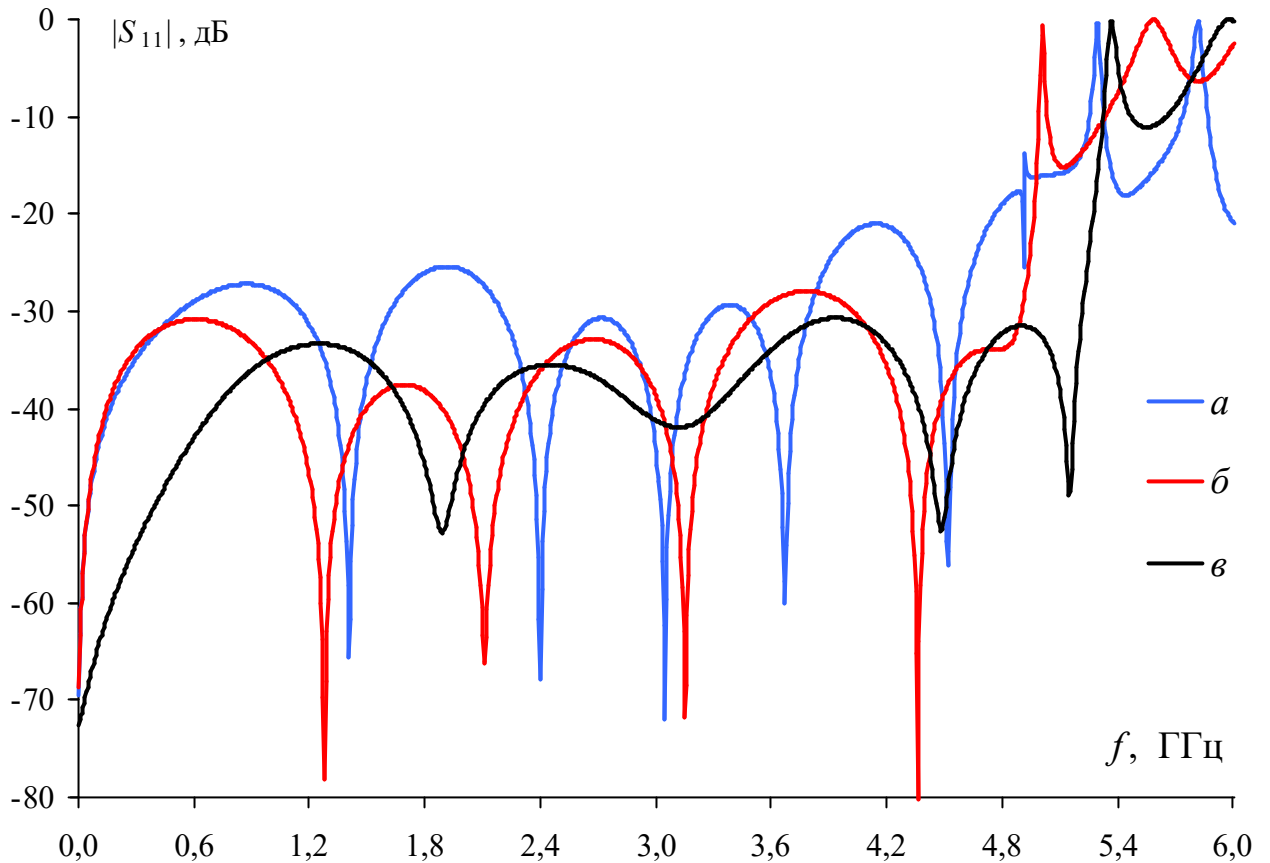


Рисунок 2.6 – Частотные зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ для ТЕМ-камер с пирамидальными переходами (а), с прямоугольным корпусом (б), с сужающимися переходами при неизменной высоте корпуса (в)

Для дальнейшей разработки выбран последний вариант исполнения ТЕМ-камеры, поскольку он обеспечивает лучшее из проанализированных конструкций согласование с фидерным трактом 50 Ом. Для подтверждения сходимости результатов анализа выполнен повторный электродинамический анализ с учащением сетки МКЭ и методом матрицы линий передачи (ММЛП). Настройка шага дискретизации производилось заданием числа подынтервалов на длину волны вблизи модели (первый индекс) и на границе анализируемого объема пространства (второй индекс). Представлены результаты электродинамического анализа, полученные с использованием МКЭ (рисунок 2.7) и ММЛП (рисунок 2.8).

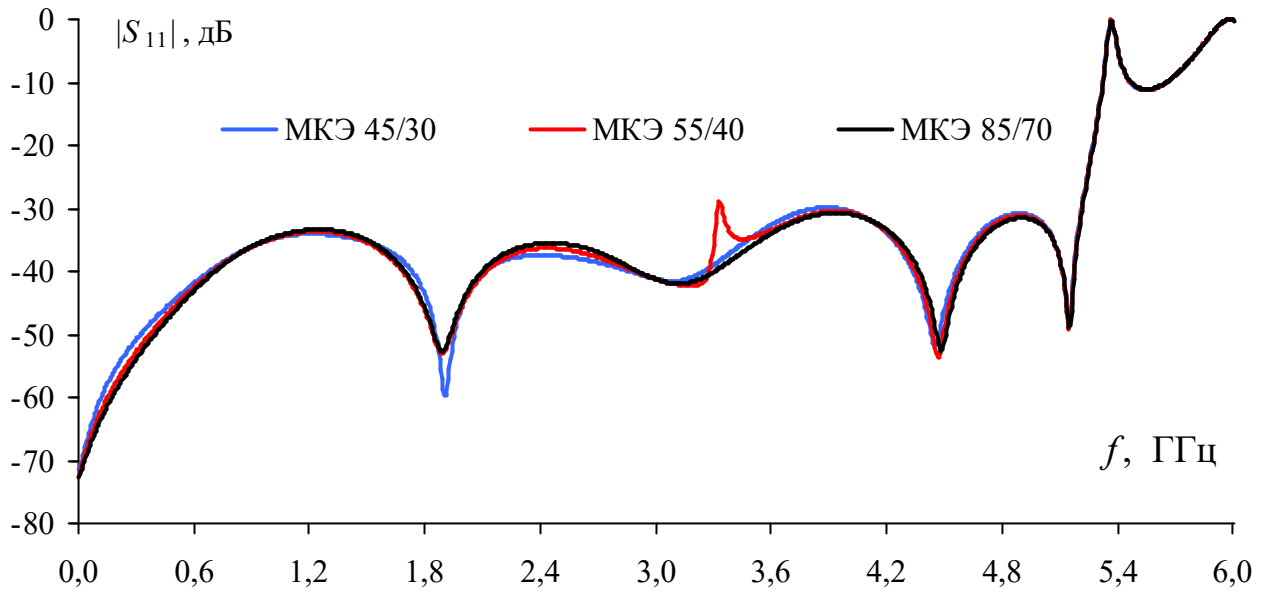


Рисунок 2.7 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры, полученные с использованием МКЭ при увеличении шага сетки

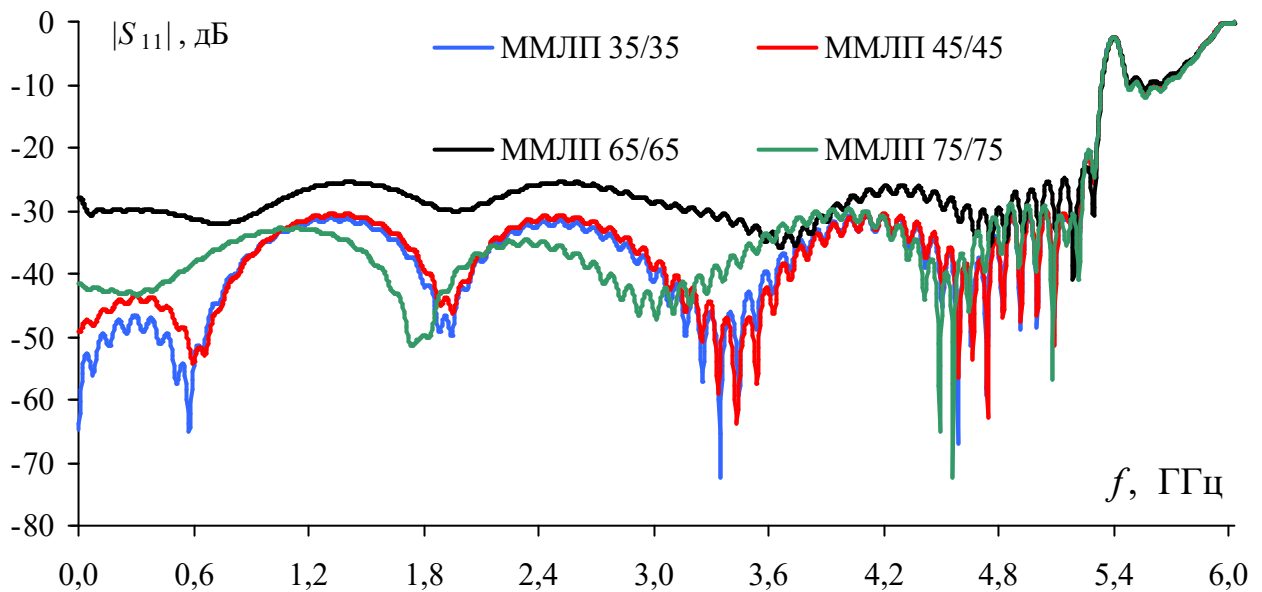


Рисунок 2.8 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры, полученные с использованием метода MMЛП при увеличении шага сетки

Анализ результатов выявил совпадение частотных зависимостей $|S_{11}|$, полученных с помощью МКЭ. Результаты, полученные MMЛП, показали худшую повторяемость, однако учащение сетки позволило получить менее “изрезанные” частотные зависимости и избавиться от ложного резонанса на частоте 0,6 ГГц. Отличие значений, полученных MMЛП с шагом сетки $\lambda / 65$ объясняется

неверным разбиением модели из-за введенной продольной плоскости симметрии, что часто используется для ускорения анализа симметричных структур. Между тем, максимальные значения $|S_{11}|$, полученные с помощью МКЭ и ММЛП, близки и не превышают минус 30 дБ на частотах до 5,3 ГГц (рисунок 2.8).

Оценка напряженности поля электродинамической модели камеры производилась при помощи точечных мониторов поля. Размещение мониторов производилось на границах области размещения испытуемой ИС по квадратной сетке 30×30 мм с шагом 15 мм на высоте 2 мм от нижней стенки корпуса камеры (рисунок 2.9).

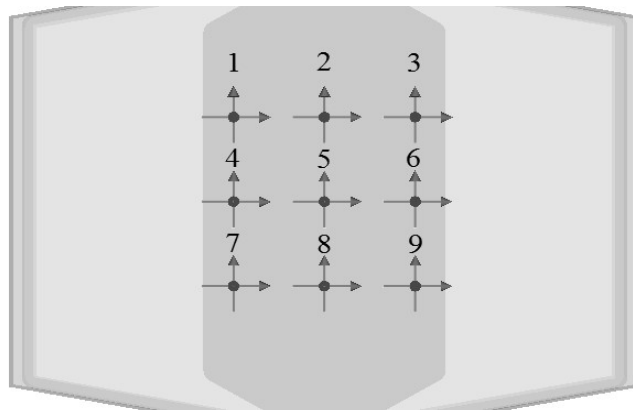


Рисунок 2.9 – Размещение точечных мониторов поля в месте расположения ИО
(вид сверху)

Анализ в частотной области модуля напряженности электрического поля показал, что неравномерность формируемого поля в испытуемом объеме составляет ± 3 дБ на частотах до 5 ГГц (рисунок 2.10). На более высоких частотах распространяются волны высших типов, что приводит к увеличению неравномерности распределения поля (рисунок 2.11). Из-за симметрии конструкции результаты вычислений в местах расположения мониторов 3, 6 и 9 совпадают с 1, 4 и 7 соответственно, в связи с чем повторяющиеся данные на рисунках 2.10–2.11 не приведены.

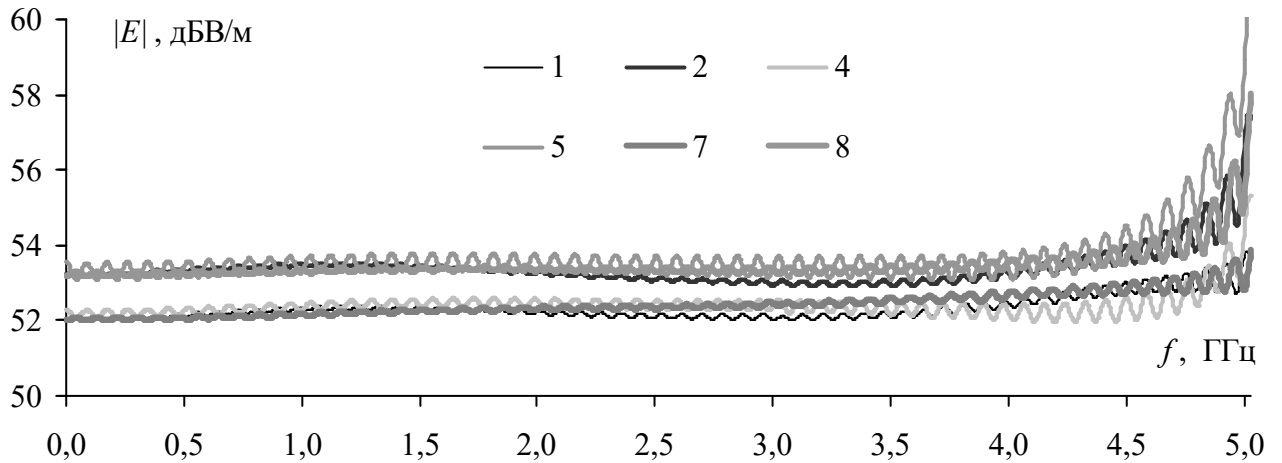


Рисунок 2.10 – Частотные зависимости напряженности электрического поля в месте расположения мониторов поля (1, 2, 4, 5, 7, 8) в диапазоне частот до 5 ГГц

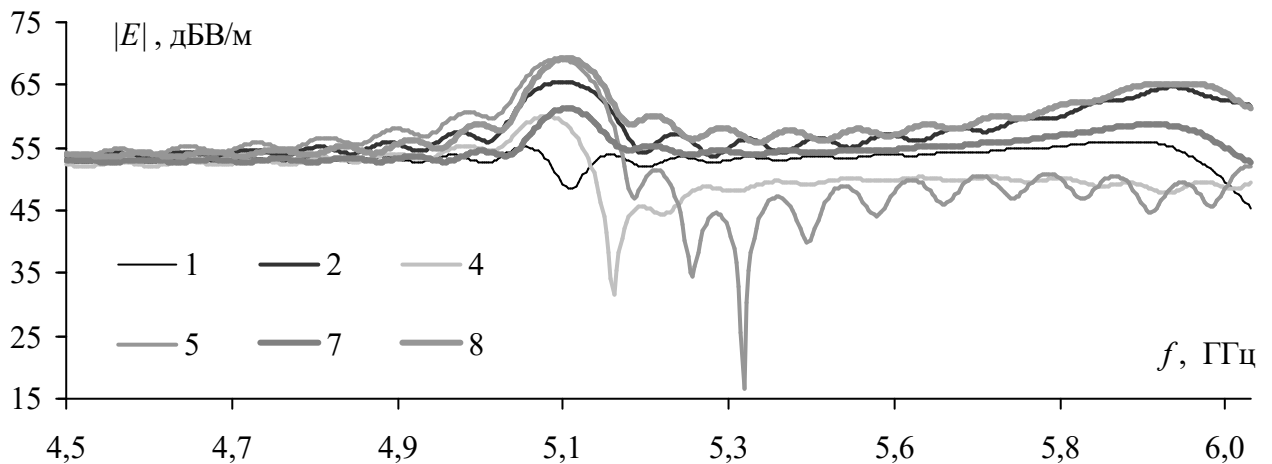


Рисунок 2.11 – Частотные зависимости напряженности электрического поля в месте расположения мониторов поля (1, 2, 4, 5, 7, 8) в диапазоне частот 4,5–6 ГГц

2.3 Разработка лабораторного макета

На основе полученной электродинамической модели разработана твердотельная модель ТЕМ-камеры. Для монтажа СВЧ-соединителей и центрального проводника необходим доступ к внутреннему пространству ТЕМ-камеры, поэтому корпус разделён на две части, соединяемые посредством винтового механического соединения (рисунок 2.12).

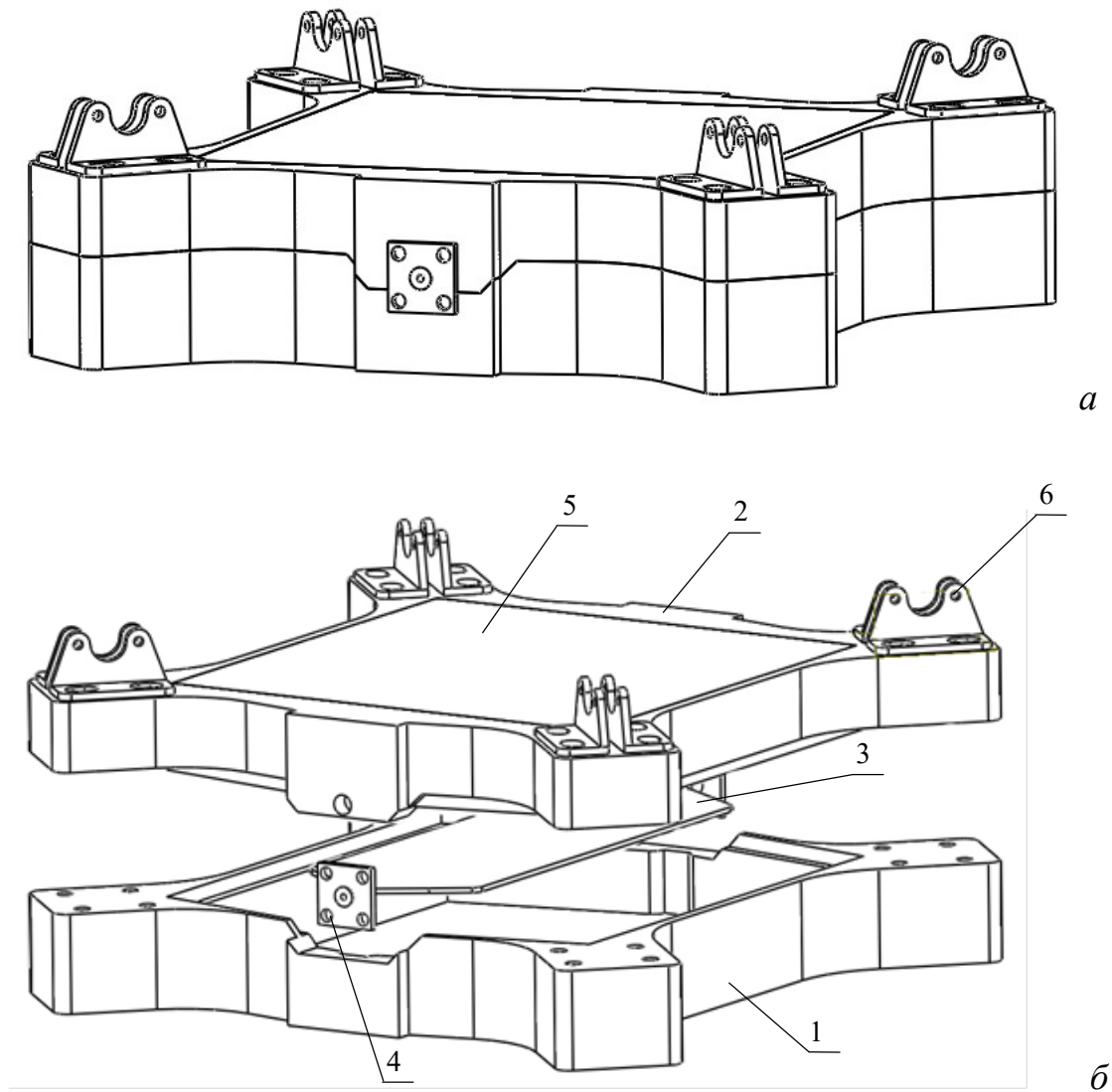


Рисунок 2.12 – Изометрический вид (а) и компоненты конструкции (б) твердотельной модели ТЕМ камеры: 1 – основание корпуса, 2 – крышка, 3 – центральный проводник, 4 – СВЧ-соединители, 5 – испытательный стол, 6 – зажим

При разработке твердотельной модели учтены особенности сборки камеры: крепление СВЧ-соединителей к корпусу и их пайка с центральным проводником (рисунок 2.13 а), а также крепление для зажимов, обеспечивающих электрический контакт полигона земли на испытательной ПП с корпусом камеры (рисунок 2.13 б). При разработке конструкции учтены допуски на изготовление деталей опытного образца, в связи с чем размеры всей конструкции пересчитаны с точностью до 100 мкм.

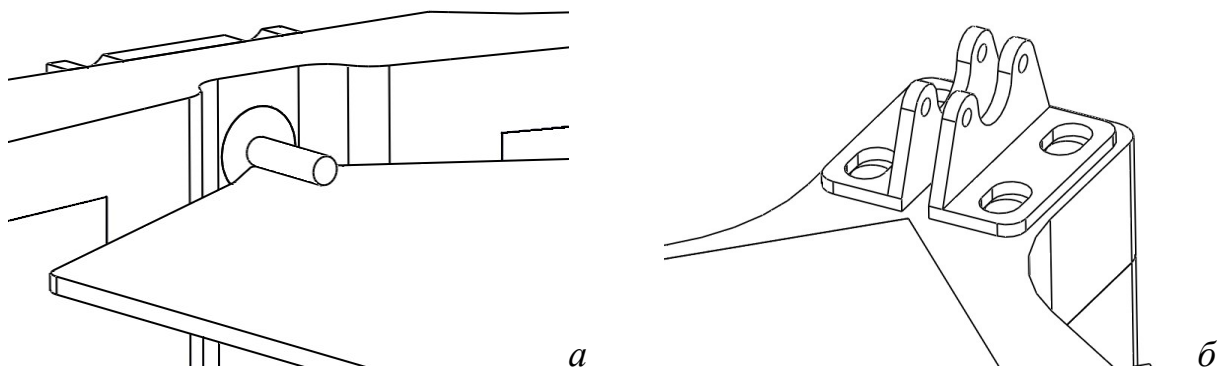


Рисунок 2.13 – Соединение центрального проводника с СВЧ-соединителем (а),
крепление зажима испытательной ПП (б)

Для оценки влияния внесенных в конструкцию изменений на её характеристики выполнен повторный электродинамический анализ твердотельной модели (рисунок 2.14). Из полученных результатов видно, что внесение изменений в конструкцию, связанных с точностью изготовления лабораторного макета на основе твердотельной модели, привело к увеличению максимального значения $|S_{11}|$ до уровня минус 20 дБ в рабочем диапазоне частот, в то время как для электродинамической модели данное значение не превышает уровня минус 28 дБ.

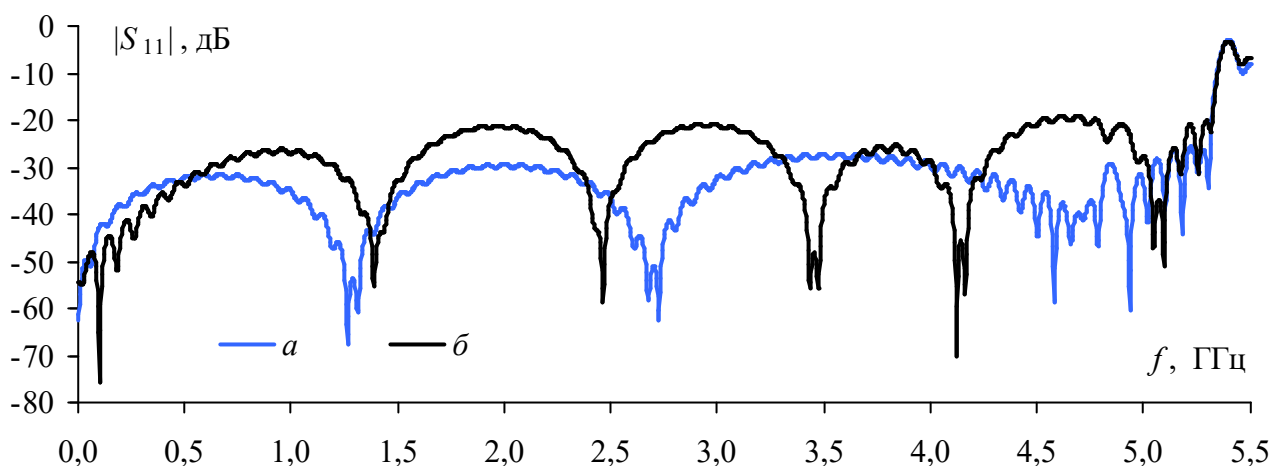


Рисунок 2.14 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ электродинамической (а)
и разработанной твердотельной (б) моделей ТЕМ-камеры

На рисунке 2.15 показаны основные элементы конструкции лабораторного макета ТЕМ-камеры. Испытательный стол, основание и крышка корпуса изготовлены посредством фрезерной обработки алюминиевых плит станком с числовым программным управлением, а центральный проводник выполнен посредством гидроабразивной резки медного листа. Для защиты от коррозии на центральный проводник нанесено гальваническое покрытие серебром, а на остальные элементы конструкции – покрытие никелем.

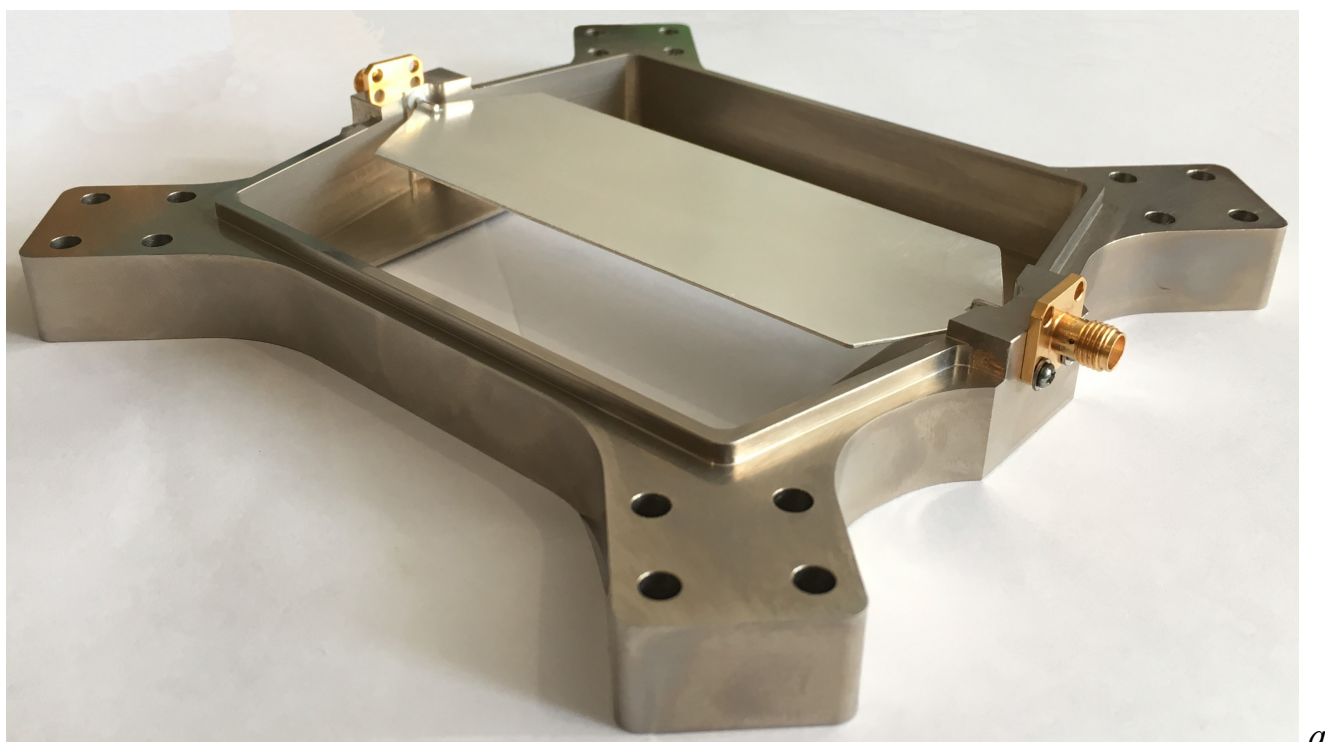
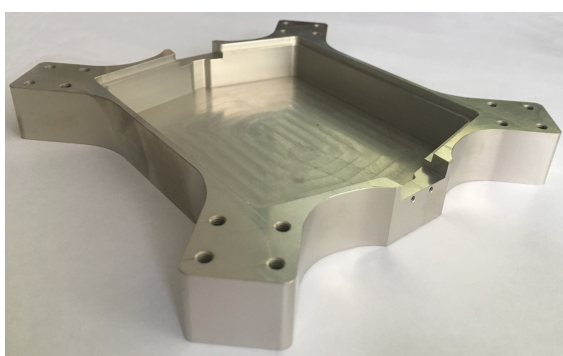
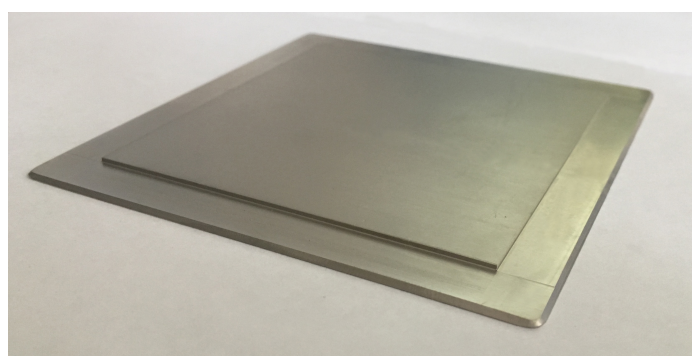
*a**б**в*

Рисунок 2.15 – Основные элементы лабораторного макета ТЕМ-камеры: крышка корпуса с подключенными СВЧ-соединителями и центральным проводником (*a*), основание корпуса (*б*), испытательный стол (*в*)

После монтажа СВЧ-соединителей и центрального проводника (рисунок 2.15 *а*), выполнена сборка крышки и основания корпуса посредством винтового соединения, как показано на рисунке 2.16.

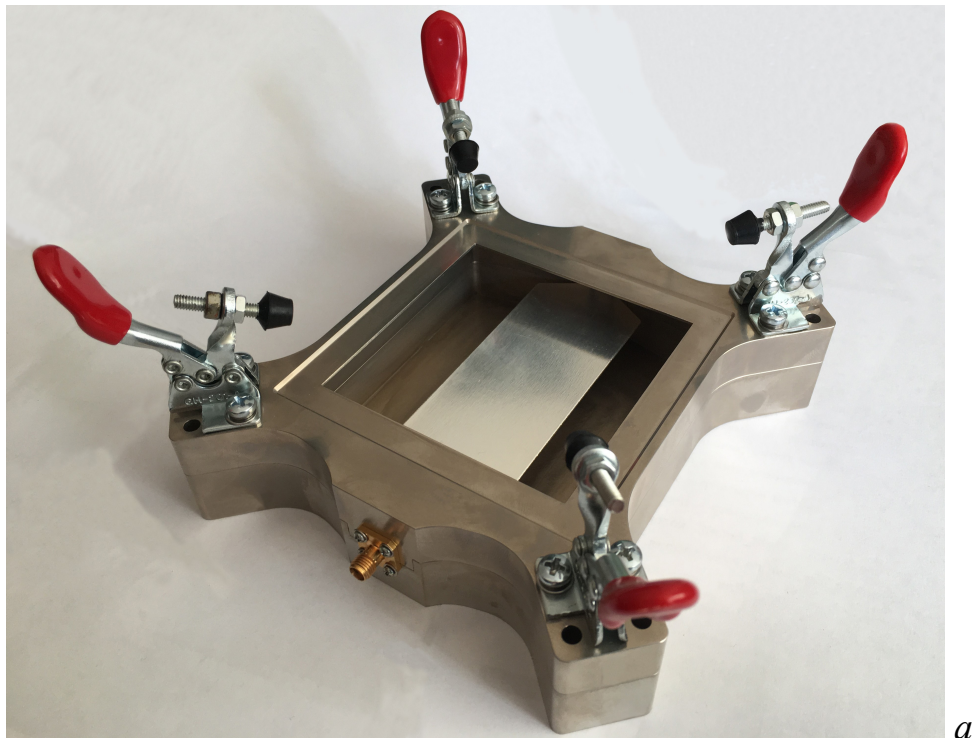


Рисунок 2.16 – Лабораторный макет ТЕМ-камер с открытой апертурой (*а*) и испытательным столом (*б*)

На рисунке 2.17 показан стенд для измерения S -параметров лабораторного макета ТЕМ-камеры, включающий в себя векторный анализатор цепей P4M-18 с набором коаксиальных переходов и калибровочных мер.

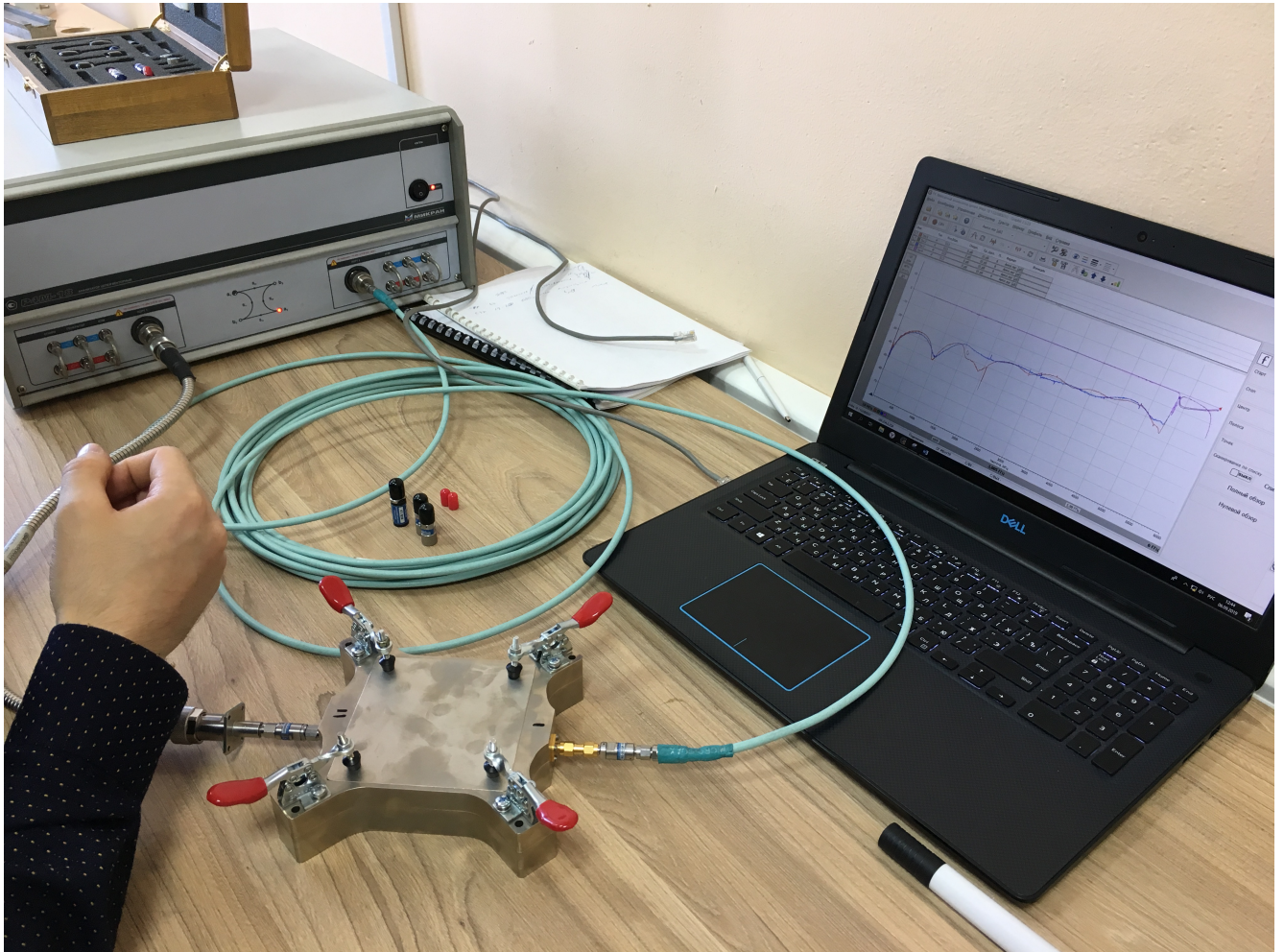


Рисунок 2.17 – Стенд для измерения S -параметров ТЕМ-камеры с помощью векторного анализатора цепей P4M-18

На рисунке 2.18 приведены измеренные частотные зависимости модулей коэффициента отражения $|S_{11}|$ и коэффициента передачи $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 18 ГГц. Из полученных зависимостей видно, что значения $|S_{11}|$ не превышают уровень минус 17,1 дБ, а значения $|S_{21}|$ находятся в диапазоне от 0 до минус 1 дБ до граничной частоты 5,3 ГГц, после которой возбуждаются волны высших типов.

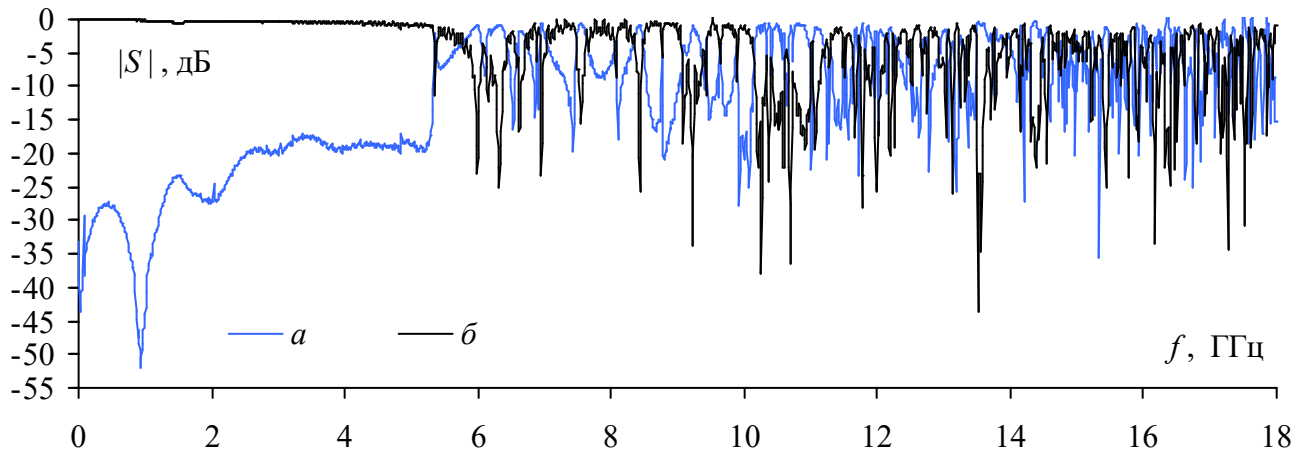


Рисунок 2.18 – Измеренные S -параметры ТЕМ-камеры:

частотные зависимости $|S_{11}|$ (a) и $|S_{21}|$ (b) в диапазоне частот до 18 ГГц

На рисунке 2.19 приведено сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ электродинамической, твердотельной моделей и лабораторного макета ТЕМ-камеры. Из сравнения видно, что максимальное отклонение измеренных значений $|S_{11}|$ от результатов, полученных для твердотельной модели, составляет 5,1 дБ, при этом максимальное отклонение от результатов электродинамического моделирования составляет 12 дБ на частоте 4,83 ГГц.

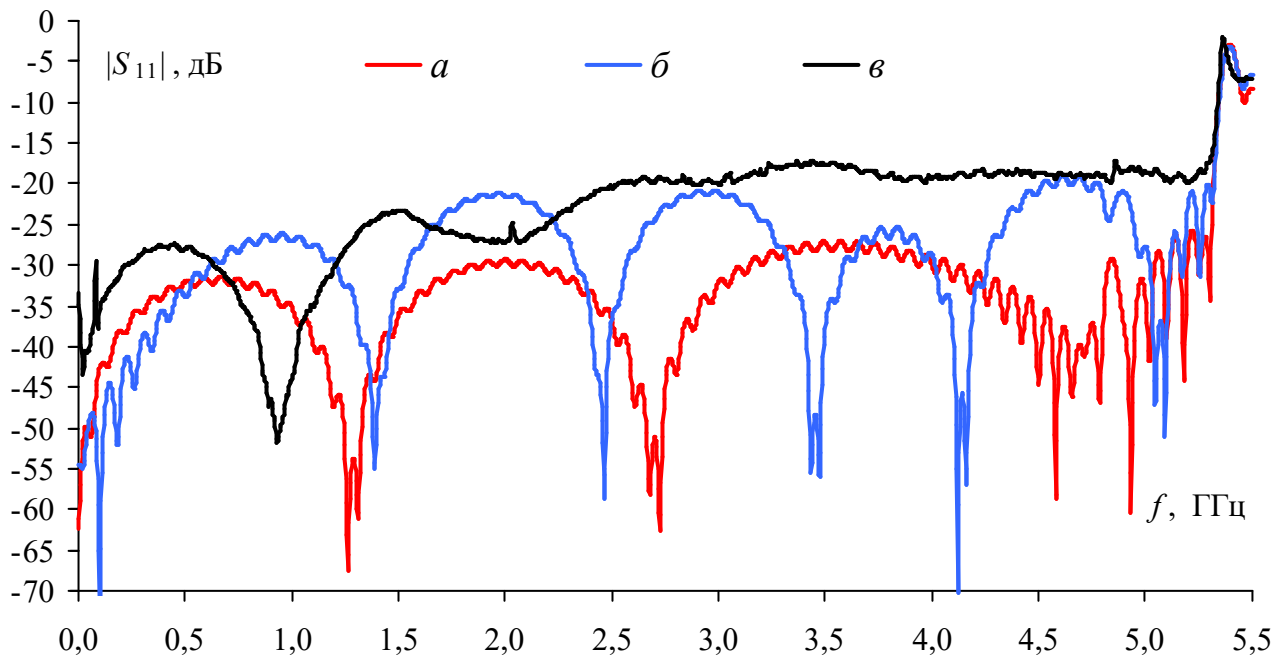


Рисунок 2.19 – Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ электродинамической (a), твердотельной (b) моделей и лабораторного макета (c) ТЕМ-камеры

2.4 Примеры использования

С помощью разработанной ТЕМ-камеры и измерительного приемника Rohde&Schwarz ESRP выполнено измерение излучаемой помехоэмиссии от микроконтроллера модели 1986BE91T на базе ядра ARM Cortex-M3 производства компании АО “ПКК Миландр” (рисунок 2.20). Испытуемый микроконтроллер согласно стандарту [17] размещен на измерительной ПП, как указано в подразделе 2.1. На рисунке 2.21 *а* представлена лицевая сторона двуслойной измерительной ПП с испытуемой ИС, обратная сторона ПП с размещенным на ней периферийным оборудованием для обеспечения работы ИС представлена на рисунке 2.21 *б*.

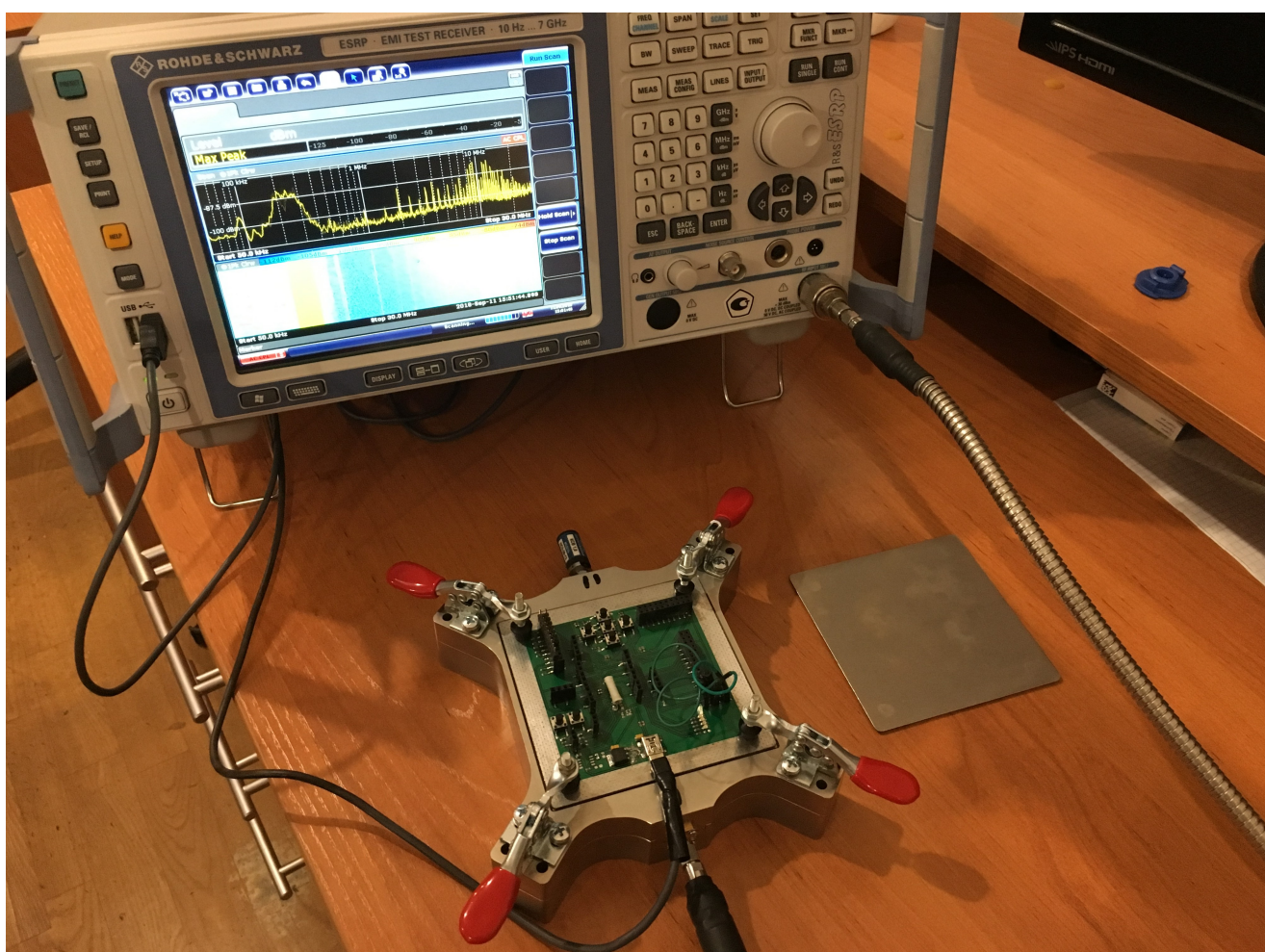


Рисунок 2.20 – Измерение помехоэмиссии микроконтроллера 1986BE91T с помощью ТЕМ-камеры и измерительного приемника

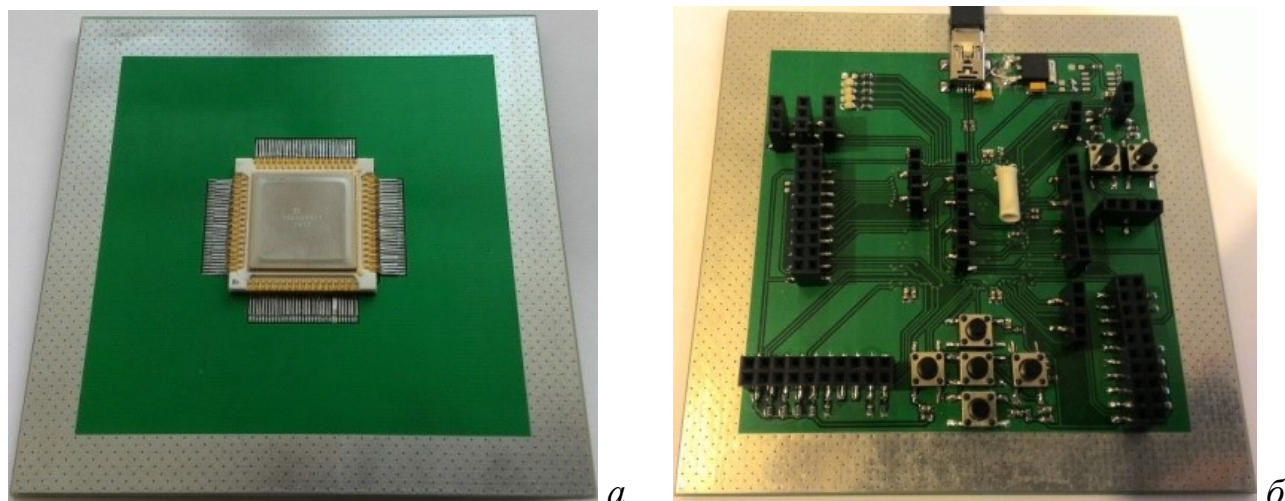
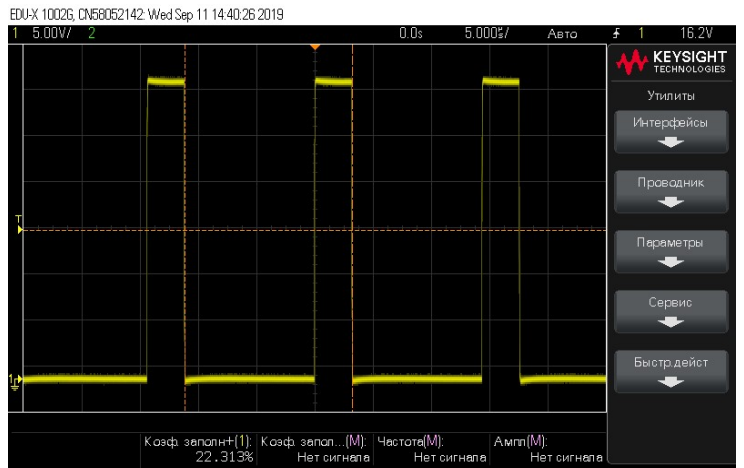
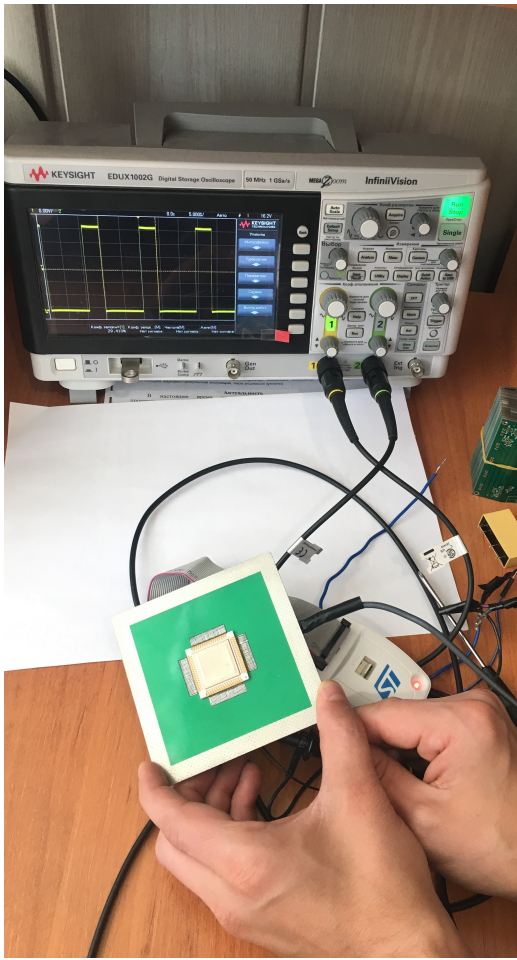


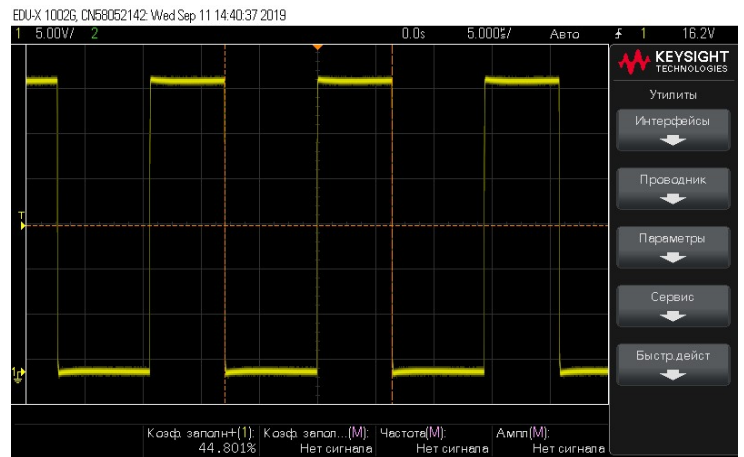
Рисунок 2.21 – Измерительная ПП с ИС (микроконтроллер 1986BE91Т),
лицевая (а) и обратная (б) стороны

При включении электропитания измерительной ПП, испытываемая ИС с тактовой частотой работы 80 МГц начинает непрерывное выполнение программы, которая формирует и генерирует сигналы амплитудой 3,3 В и широтно-импульсной модуляцией с коэффициентами заполнения 25 и 45% и частотой повторения 70 кГц (рисунок 2.22). Измерение излучаемой помехоэмиссии выполнено при четырех положениях ПП относительно апертуры ТЕМ-камеры посредством ее поворота на каждые 90° и повторном измерении излучаемой помехоэмиссии. На рисунке 2.23 приведены два варианта расположения ПП.



а

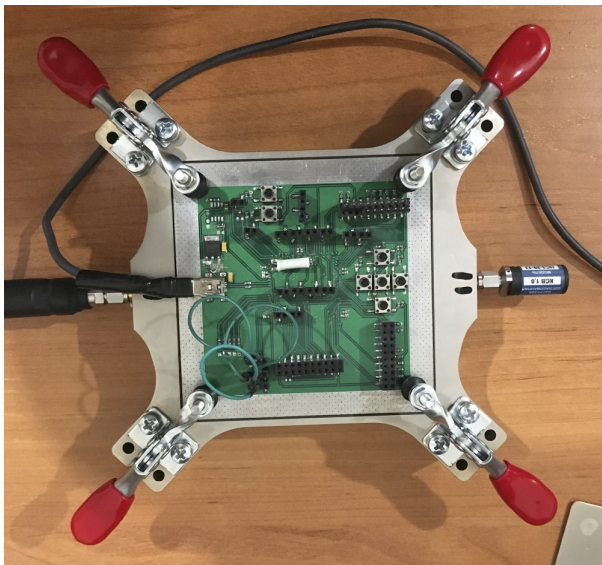
б



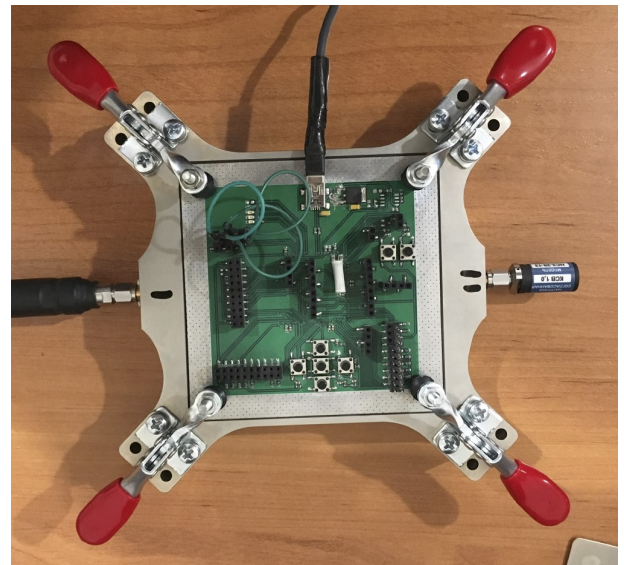
а

б

Рисунок 2.22 – Измерение осциллограмм сигналов ШИМ с ПП (а):
с коэффициентами заполнения 25% (б) и 45% (в)



а



б

Рисунок 2.23 – ТЕМ-камера с измерительной ПП:
исходный вариант размещения (а) и поворот на 90°(б)

Измеренные частотные зависимости излучаемой помехоэмиссии ИС в диапазоне частот 50 кГц–1 МГц представлены на рисунке 2.24, в диапазоне 1–30 МГц – на рисунке 2.25, в диапазоне 30 МГц–1 ГГц – на рисунке 2.26 и в диапазоне 1–5,2 ГГц – на рисунке 2.27.

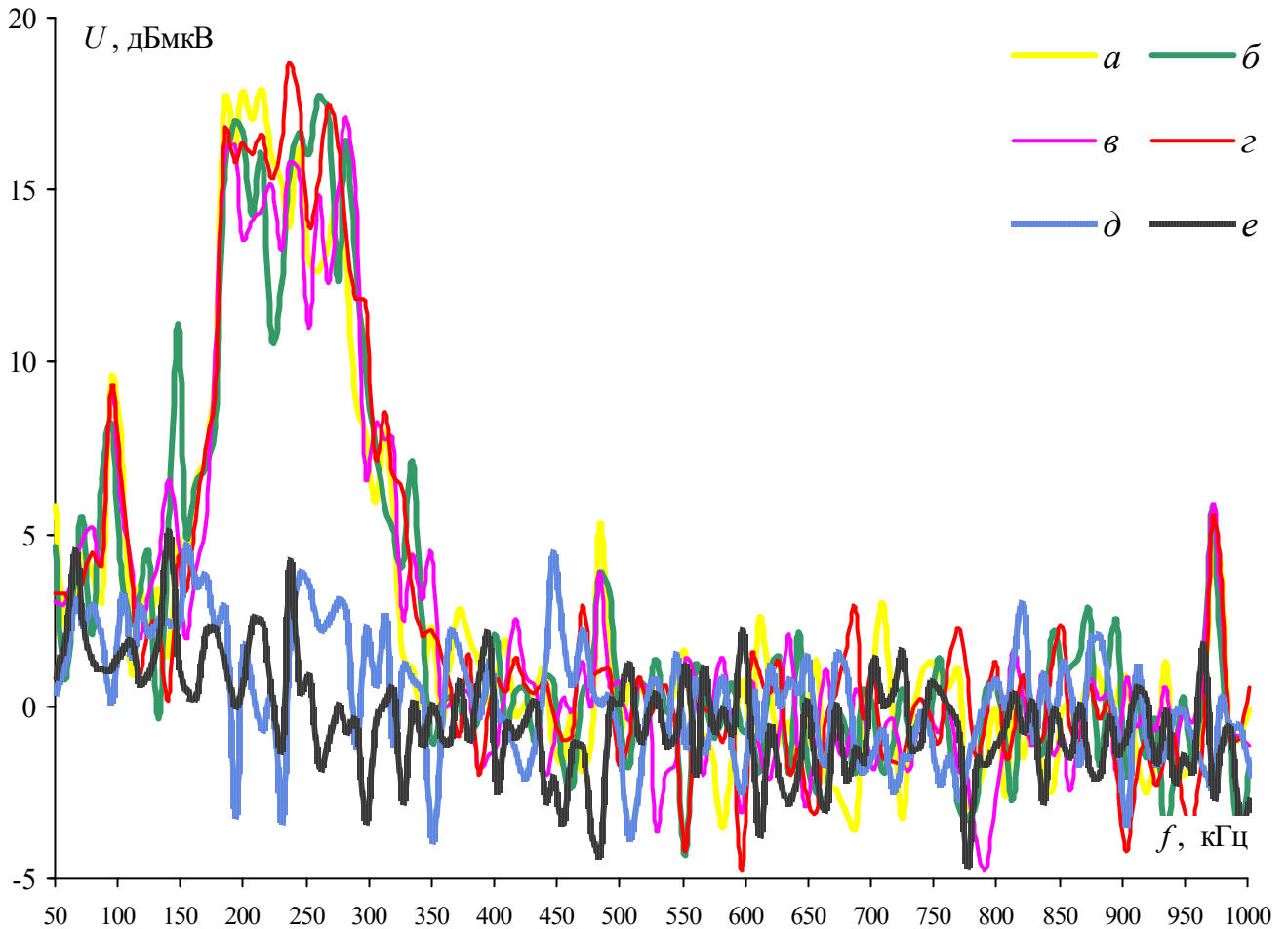


Рисунок 2.24 – Измеренные частотные зависимости напряжений U на входе измерительного приемника в диапазоне частот 50 кГц–1 МГц, полученные при функционировании ИС и ее размещении каждые 90° в апертуре ТЕМ-камеры (a – $г$), при выключенной ИС ($д$), при размещении испытательного стола ($е$)

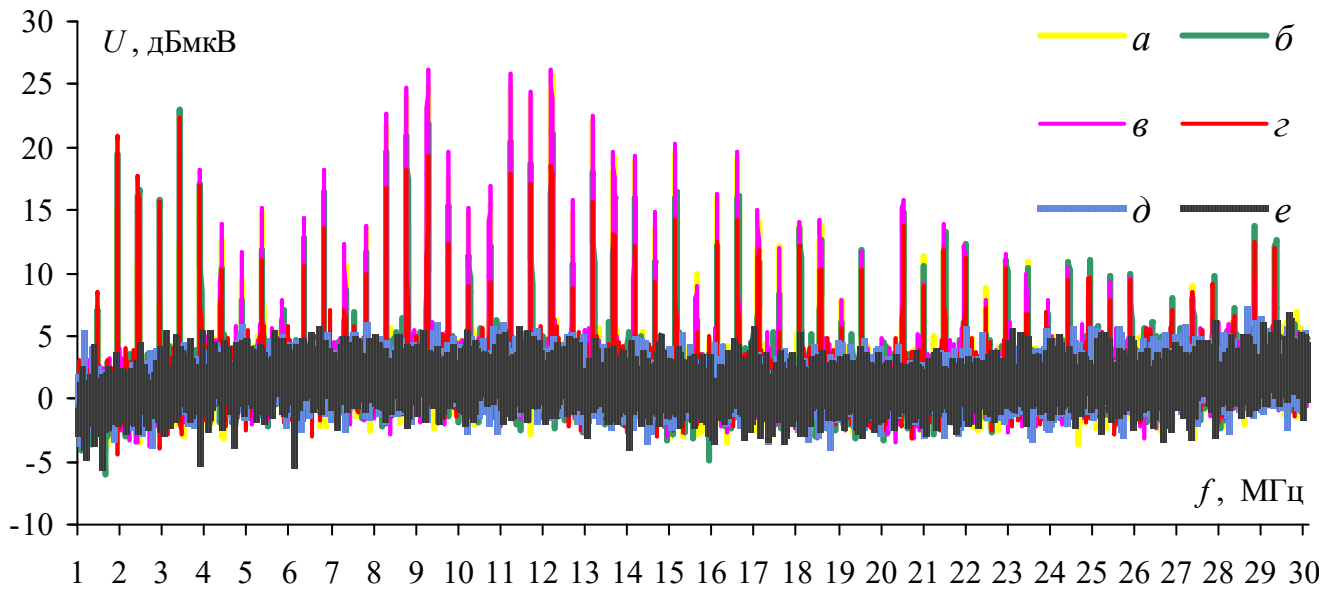


Рисунок 2.25 – Измеренные частотные зависимости напряжений U на входе измерительного приемника в диапазоне частот 1–30 МГц, полученные при функционировании ИС и ее размещении каждые 90° в апертуре ТЕМ-камеры (a – $г$), при выключенной ИС ($д$), при размещении испытательного стола ($е$)

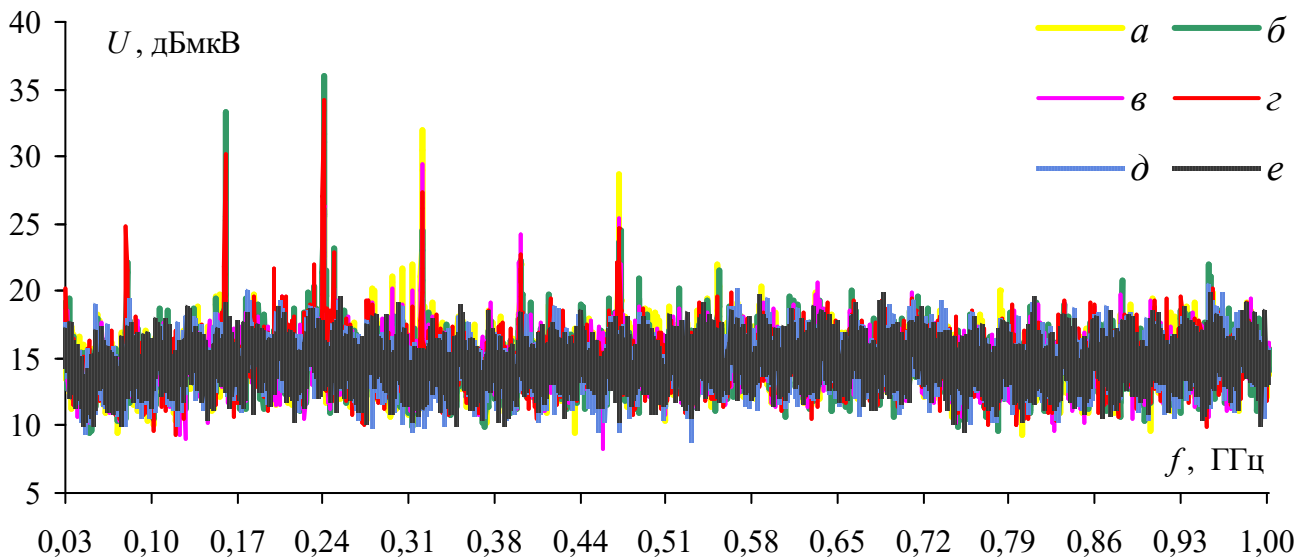


Рисунок 2.26 – Измеренные частотные зависимости напряжений U на входе измерительного приемника в диапазоне частот 30 МГц–1 ГГц, полученные при функционировании ИС и ее размещении каждые 90° в апертуре ТЕМ-камеры (a – $г$), при выключенной ИС ($д$), при размещении испытательного стола ($е$)

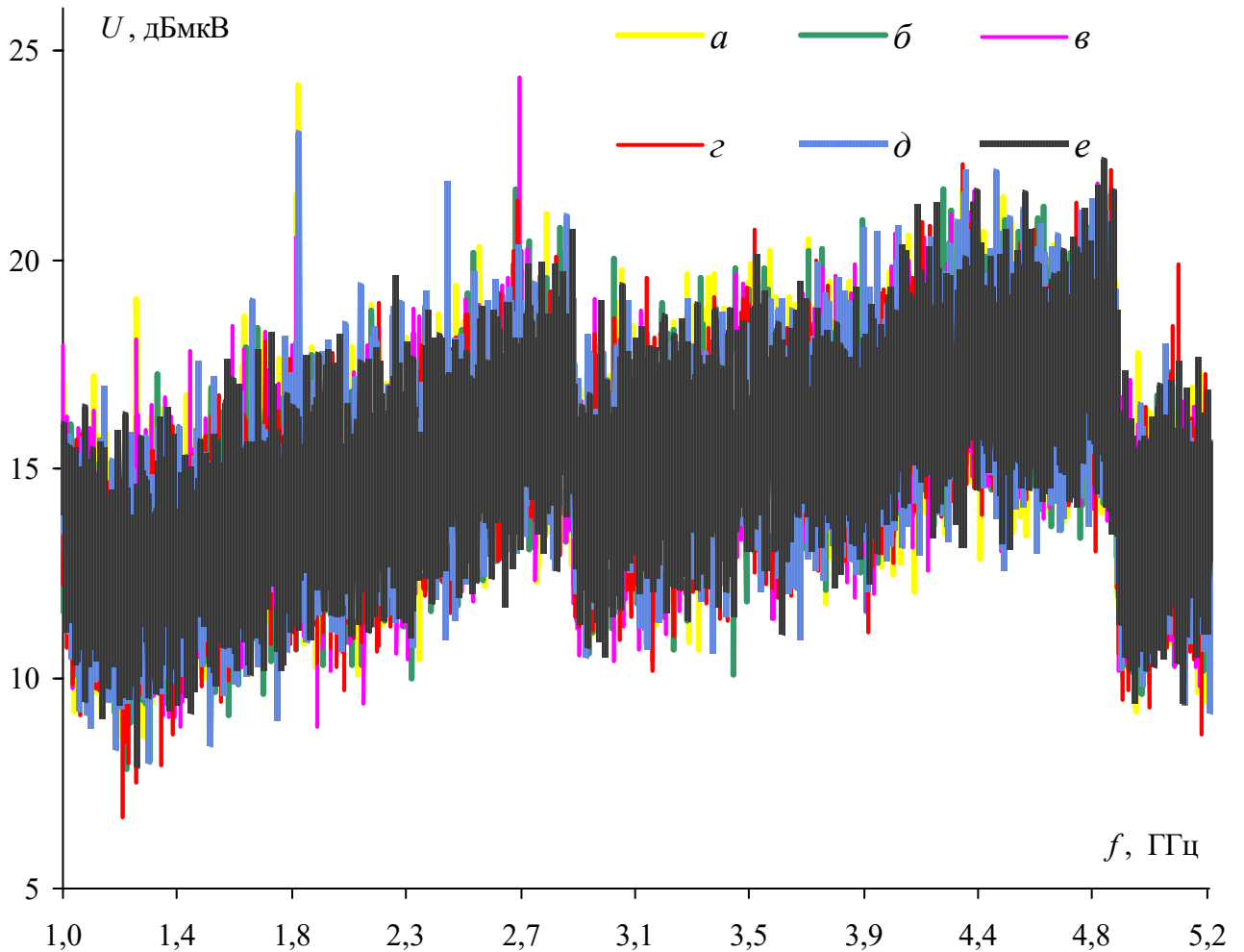


Рисунок 2.27 – Измеренные частотные зависимости напряжений U на входе измерительного приемника в диапазоне частот 1 ГГц–5,2 ГГц, полученные при функционировании ИС и ее размещении каждые 90° в апертуре ТЕМ-камеры (a – $г$), при выключенной ИС ($д$), при размещении испытательного стола (e)

В диапазоне частот 70–80 кГц наблюдается рост эмиссии на 8–9 дБ относительно уровня измеренного напряжения при выключенной ИС, который определяется формированием сигналов с широтно-импульсной модуляцией с данными частотами повторения (рисунок 2.24). В диапазоне частот 1 МГц–30 МГц наблюдаются эмиссии с максимальной амплитудой 15–20 дБ, определяемые работой кварцевого резонатора и других периферийных устройств. При этом видно, что при различном положении ПП в апертуре ТЕМ-камеры уровни эмиссии на одних и тех же частотах могут отличаться на 5–10 дБ

(рисунок 2.25). Измерения выявили, что помехоэмиссия на тактовой частоте работы ИС 80 МГц наблюдается только при двух вариантах размещения ПП (рисунок 2.26 б, в). В диапазоне частот 1–5,2 ГГц помехоэмиссия не наблюдается на зависимостях, поскольку ИС не предназначена для работы в данном диапазоне, при этом эмиссии на частотах 1,88 и 2,67 ГГц вызваны работой устройств сотовой связи в сетях 3G и 4G (рисунок 2.27), для устранения влияния которых на результаты измерений требуется переработка измерительной ПП путем введения сплошного экранирующего слоя между лицевой и обратной сторонами. При этом не выявлены причины появления помехоэмиссии в диапазоне 180–350 кГц (рисунок 2.24) и 150–450 МГц (рисунок 2.25), что требует проведения дополнительных исследований ИС на помехоэмиссию.

2.5 Основные результаты раздела

Приведены результаты разработки ТЕМ-камеры для испытаний ИС на ЭМС. Выполнен расчет геометрических параметров регулярной секции ТЕМ-камеры и рассмотрены варианты её согласования с фидерным трактом 50 Ом. Выполнены электродинамический анализ и параметрическая оптимизация различных моделей согласующих переходов с целью минимизации максимального значения частотной зависимости коэффициента отражения $|S_{11}|$ в диапазоне рабочих частот. На основе полученных при моделировании частотных зависимостей $|S_{11}|$, для дальнейшей разработки выбран вариант, обеспечивающий наилучшее согласование ($|S_{11}|$ менее минус 30 дБ). Для проверки сходимости результатов вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ с учащённой сеткой численными методами МЛП и МКЭ. Выполнено вычисление напряженности E -поля на границах объема под ИО, при этом максимальное отклонение напряженности поля составило не более 3 дБ в диапазоне частот до 5,2 ГГц. На основе рассчитанной электродинамической модели ТЕМ-камеры разработана твердотельная модель с учетом допусков и технологических особенностей изготовления деталей лабораторного макета. Повторный электродинамический анализ твердотельной модели выявил увеличение рассогласования конструкции

камеры ($|S_{11}|$ менее минус 20 дБ). Изготовлен лабораторный макет ТЕМ-камеры, пригодный для исследований и испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС с высотой профиля не более 5 мм. Измерения макета показали максимальное значение $|S_{11}|$ минус 17 дБ в диапазоне рабочих частот до 5,3 ГГц. С помощью разработанного лабораторного макета ТЕМ-камеры выполнено измерение помехоэмиссии отечественного микроконтроллера модели 1986BE91T на базе ядра ARM Cortex-M3 производства компании АО «ПКК Миландр» в диапазоне частот 50 кГц–5,2 ГГц.

3. КОАКСИАЛЬНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данном разделе представлены результаты разработки усовершенствованной коаксиальной камеры для измерения ЭЭ композитных экранирующих материалов. Для совершенствования коаксиальной камеры предлагается оптимизация её согласующих переходов без учета образца материала и анализ разных вариантов сборки конструкции при размещении образца:

– выполнены создание моделей, анализ полученных результатов с их помощью, а также разработка, создание и измерение экспериментального макета регулярной коаксиальной линии передачи с использованием СВЧ-соединителей;

– выполнен анализ 3 вариантов согласующих переходов с использованием аналитического и квазистатического методов, а также электродинамического моделирования и параметрической оптимизации [144];

– разработаны твердотельные модели коаксиальных камер по действующим нормативным документам и на их основе предложена модель усовершенствованной камеры;

– выполнен вычислительный эксперимент по измерению ЭЭ композитного экранирующего материала на основе гексаферрита, который показал корректность усовершенствованной конструкции коаксиальной камеры для проведения измерений в диапазоне частот до 10 ГГц.

3.1 Разработка и анализ регулярной коаксиальной линии

На начальном этапе разработки выполнен электродинамический анализ регулярной коаксиальной линии передачи длиной $L = 200$ мм, подключаемой к фидерному тракту посредством соединителей типа SMA. Радиусы центрального и внешнего проводников ($r_1 = 1,3$ мм и $r_2 = 2,945$ мм) вычислены исходя из требования равенства волнового сопротивления значению 50 Ом согласно (1.12) с учетом размеров соединителей $r_s = 0,64$ мм, $r_d = 2,1$ мм (рисунок 3.1).

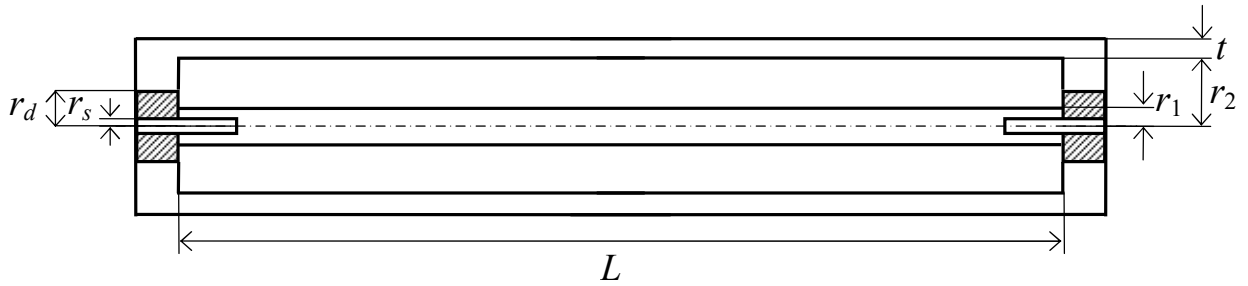


Рисунок 3.1 – Геометрические параметры регулярной коаксиальной линии с воздушным заполнением

Из вычисленных частотных зависимостей S -параметров модели регулярной коаксиальной линии видно, что модель обеспечивает требуемый уровень согласования с фидерным трактом 50 Ом. Значения $|S_{11}|$ не превышают уровень минус 15 дБ в диапазоне частот до 7,3 ГГц, при этом наблюдается рост пиков зависимости $|S_{11}|$ до минус 11 дБ на частоте 9,7 ГГц (рисунок 3.2 а), а значения $|S_{21}|$ составляют не менее минус 0,5 дБ (рисунок 3.2 б).

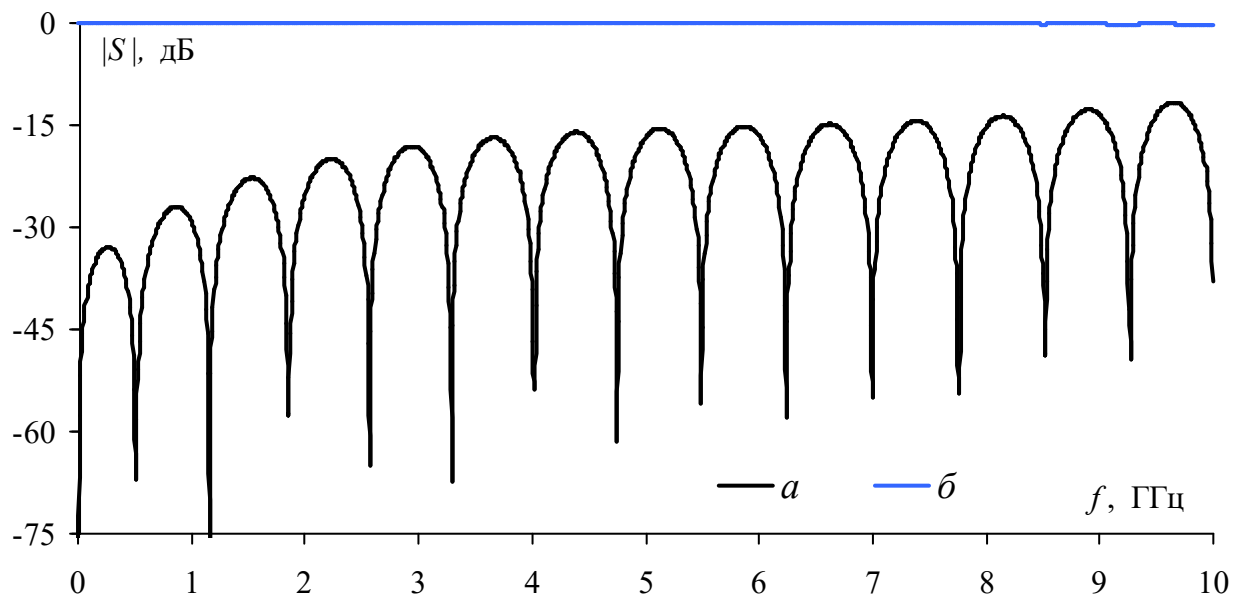


Рисунок 3.2 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) модели регулярной коаксиальной линии передачи

Выполнены моделирование, сборка и измерение макета укороченной регулярной коаксиальной линии передачи на основе двух СВЧ-соединителей (рисунок 3.3 а, г). Соединители 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 (рисунок 3.3 в, з).

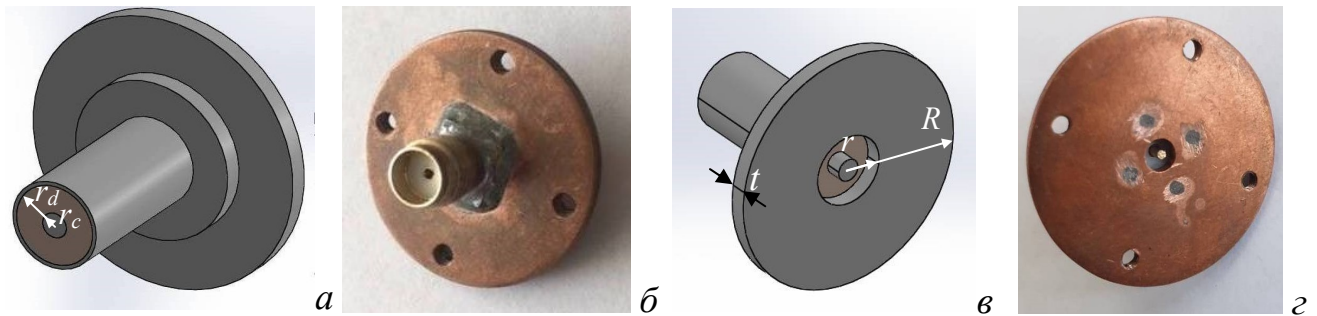


Рисунок 3.3 – Электродинамическая модель и макет коаксиальной камеры:
лицевая (а, б) и обратная (в, з) стороны

Сборка макета осуществляется посредством 4 резьбовых соединений на краях контактных площадок. При этом образуется электрический контакт между центральными проводниками соединителей (рисунок 3.4).

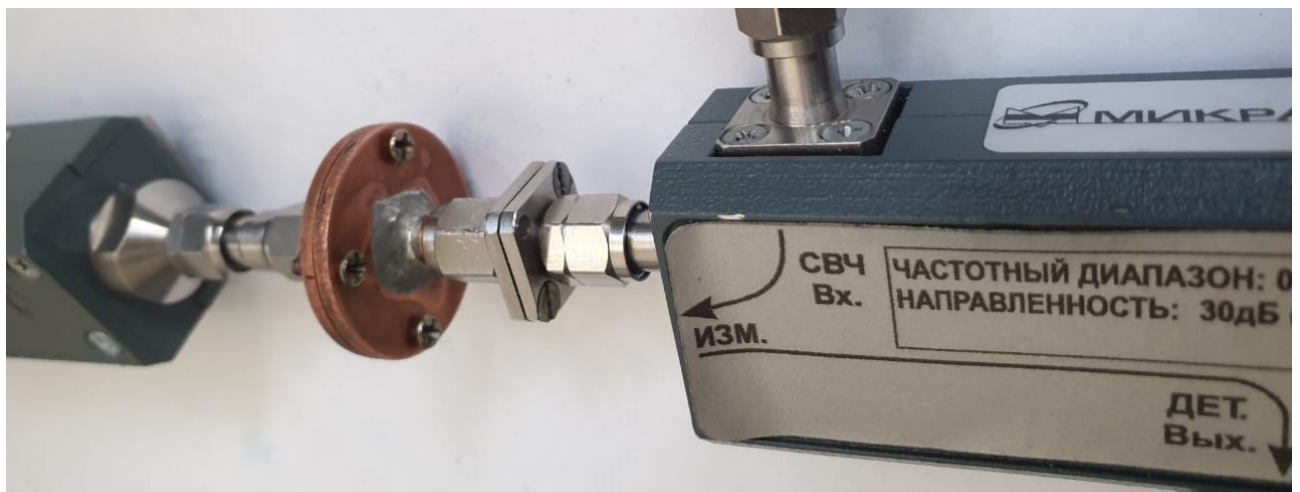


Рисунок 3.4 – Измерение S -параметров макета коаксиальной камеры
с помощью скалярного анализатора цепей P2M-40

На рисунках 3.5 и 3.6 сравнены частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ для электродинамической модели и макета регулярной коаксиальной линии. Из полученных результатов видно, что $|S_{11}|$ разработанного макета составляет менее минус 15 дБ на частотах до 6 ГГц, при этом в диапазоне 6–10 ГГц наблюдается рост данной характеристики до уровня минус 8 дБ (рисунок 3.5). Значения $|S_{21}|$

составляют не менее минус 1 дБ в исследуемом диапазоне частот, что выражается в малом расхождении измеренной и вычисленной зависимостей (рисунок 3.6).

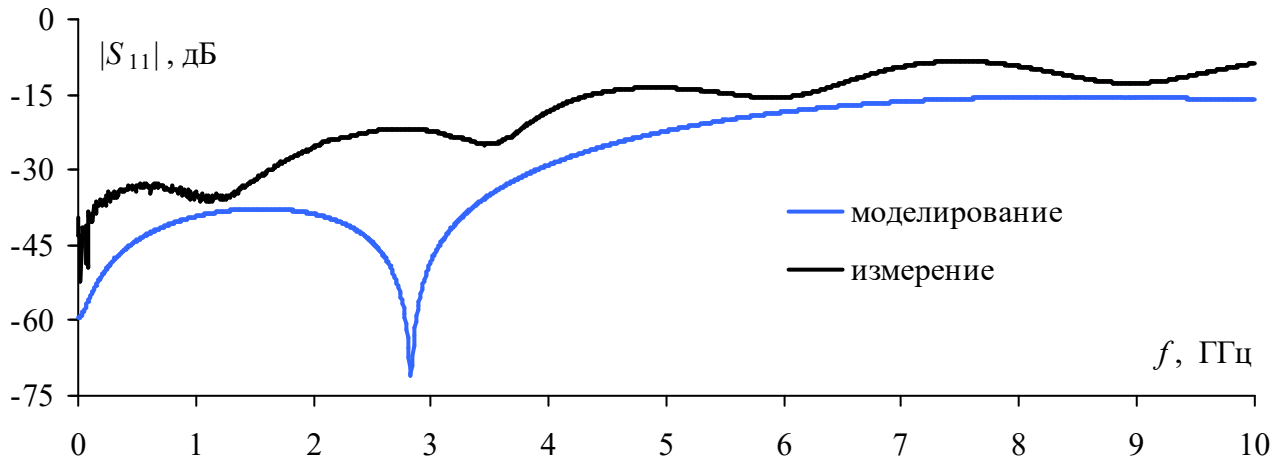


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ макета и модели регулярной коаксиальной линии

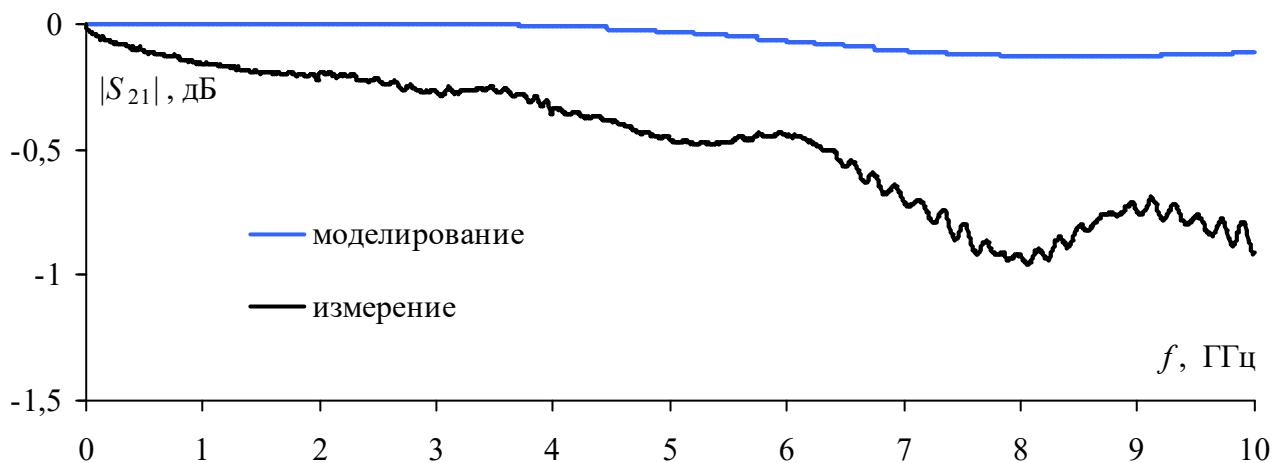


Рисунок 3.6 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ макета и модели регулярной коаксиальной линии

Из результатов электродинамического анализа и эксперимента показана возможность изготовления коаксиальной камеры, а также необходимость совершенствования конструкции камеры с целью достижения требуемого уровня согласования в более широком диапазоне частот.

3.2 Электродинамический анализ и оптимизация согласующих переходов

Выполнен анализ вариантов согласования разных форм коаксиальных переходов с воздушным заполнением для $Z = 50$ Ом, в диапазоне частот до 10 ГГц. Для этого разработаны электродинамические модели коаксиальной камеры: с линейными согласующими переходами (рисунок 3.7); с линейными смещенными (рисунок 3.8) и экспоненциальными переходами (рисунок 3.9). Размеры моделей вычислены с помощью аналитических выражений, представленных в п. 1.3, и параметрической оптимизации методом доверительных областей [143] с целью минимизации максимума частотной зависимости $|S_{11}|$.

В модели коаксиальной камеры с линейным согласующим переходом (рисунок 3.7) размеры проводников в регулярной части (r_1, r_2) вычислены исходя из требований к волновому сопротивлению и верхней граничной частоте 6 ГГц согласно выражениям (1.12)–(1.15). Согласование регулярной части с соединителями обеспечивается линейным уменьшением радиусов проводников до значений $r_{c1} = 1,30$ мм и $r_{c2} = 2,95$ мм ($Z = 50$ Ом).

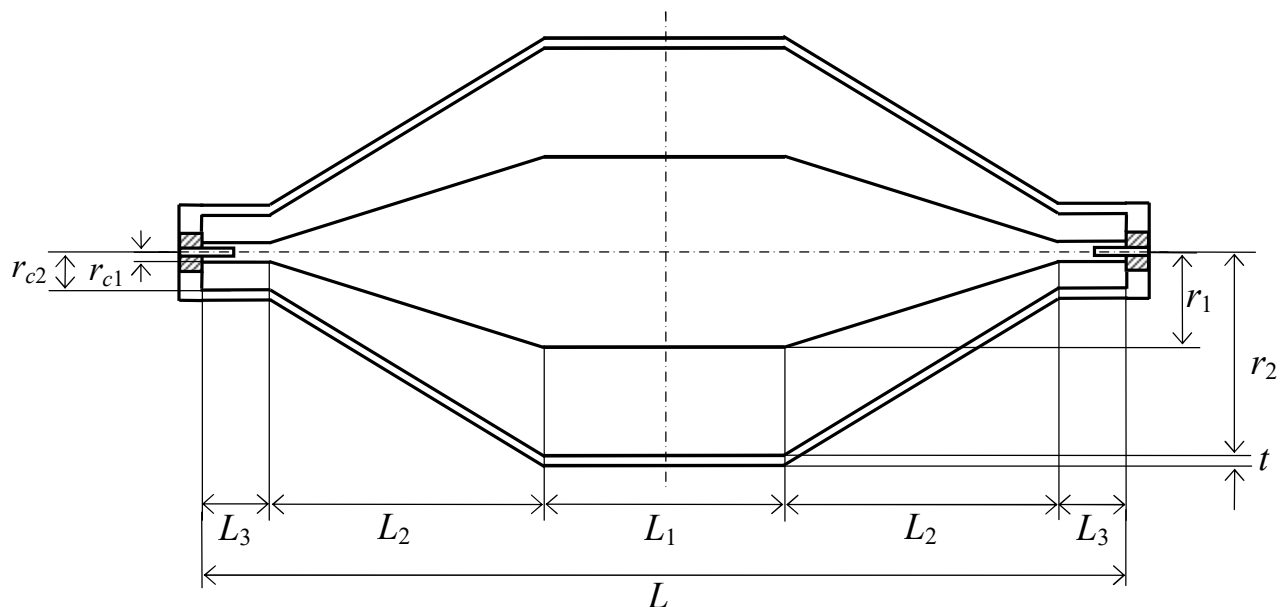


Рисунок 3.7 – Геометрические параметры коаксиальной линии передачи с линейными согласующими переходами

Согласно полученным геометрическим параметрам выполнены построение и анализ квазистатических моделей поперечных сечений камеры в регулярной части и в месте подключения коаксиальных соединителей в системе TALGAT [133–135]. Выполнена коррекция значений геометрических параметров, полученных с помощью аналитических выражений, для их соответствия требуемому волновому сопротивлению 50 Ом. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры центрального и внешнего проводников

Метод	r_1 , мм	r_2 , мм	r_{c1} , мм	r_{c2} , мм
Аналитический	4,77	11,13	2,60	5,99
Квазистатический	4,85	11,18	2,60	5,89

По результатам параметрической оптимизации длины L_2 при $L = 200$ мм получены следующие значения: $L_1 = 37,30$ мм, $L_2 = 67,70$ мм, $L_3 = 14,00$ мм (рисунок 3.7).

Рассмотрена модель коаксиальной линии с линейными смещенным согласующими переходами, характеризующаяся различными длинами центрального и внешнего проводников в регулярной части (L_1, L_4) и в области подключения соединителей (L_3, L_6) (рисунок 3.8).

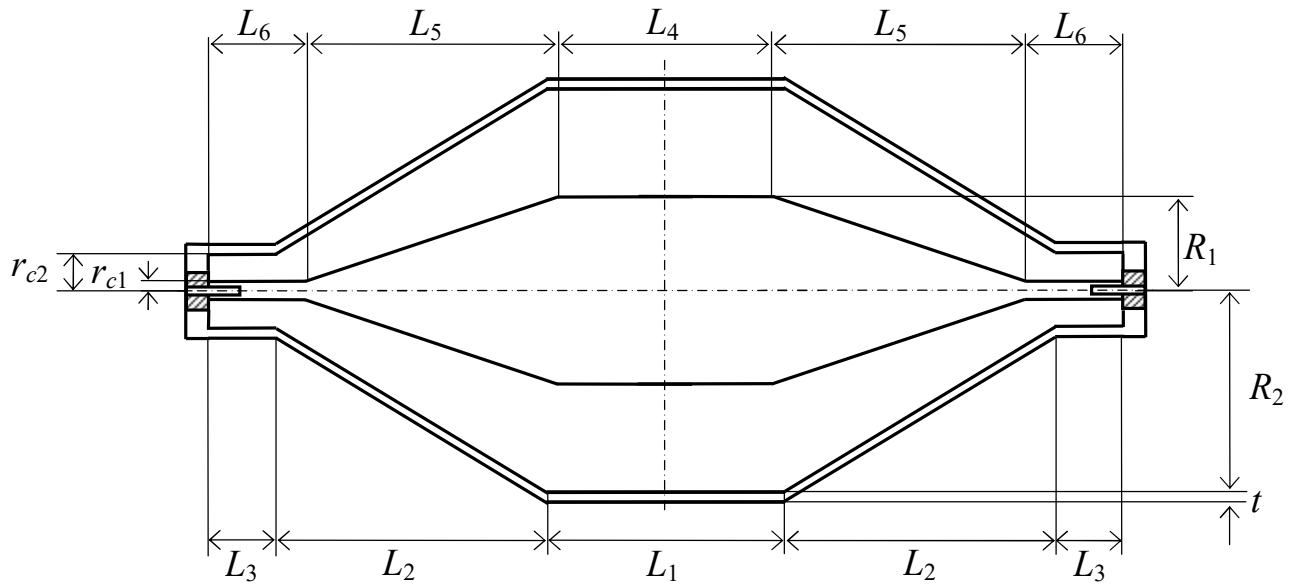


Рисунок 3.8 – Геометрические параметры коаксиальной линии передачи с линейными неравномерными согласующими переходами

При выборе геометрических параметров модели оптимизировались значения параметров L_2 и L_5 , результаты оптимизации сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Оптимальные значения геометрических параметров длин проводников коаксиальной линии с линейными смещенными переходами

L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм	L_4 , мм	L_5 , мм	L_6 , мм
49,64	61,72	13,81	37,30	67,70	14,00

Рассмотрена модель коаксиальной линии с экспоненциальными согласующими переходами (рисунок 3.9). Изменение радиуса внешнего проводника в продольном направлении описывается кривой, проходящей через 5 точек, соответствующих размерам r_1 , Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 и r_2 и удаленных друг от друга расстояния ΔL_1 , ΔL_2 , ΔL_3 и ΔL_4 , как показано на рисунке 3.9 а. Радиус центрального проводника уменьшается в продольном направлении по кривой, описываемой 4 точками, соответствующих размерам r_{c1} , Δr_{c1} , Δr_{c2} и r_{c2} и находящихся на расстояниях ΔL_{c1} , ΔL_{c2} и ΔL_{c3} (рисунок 3.9 б).

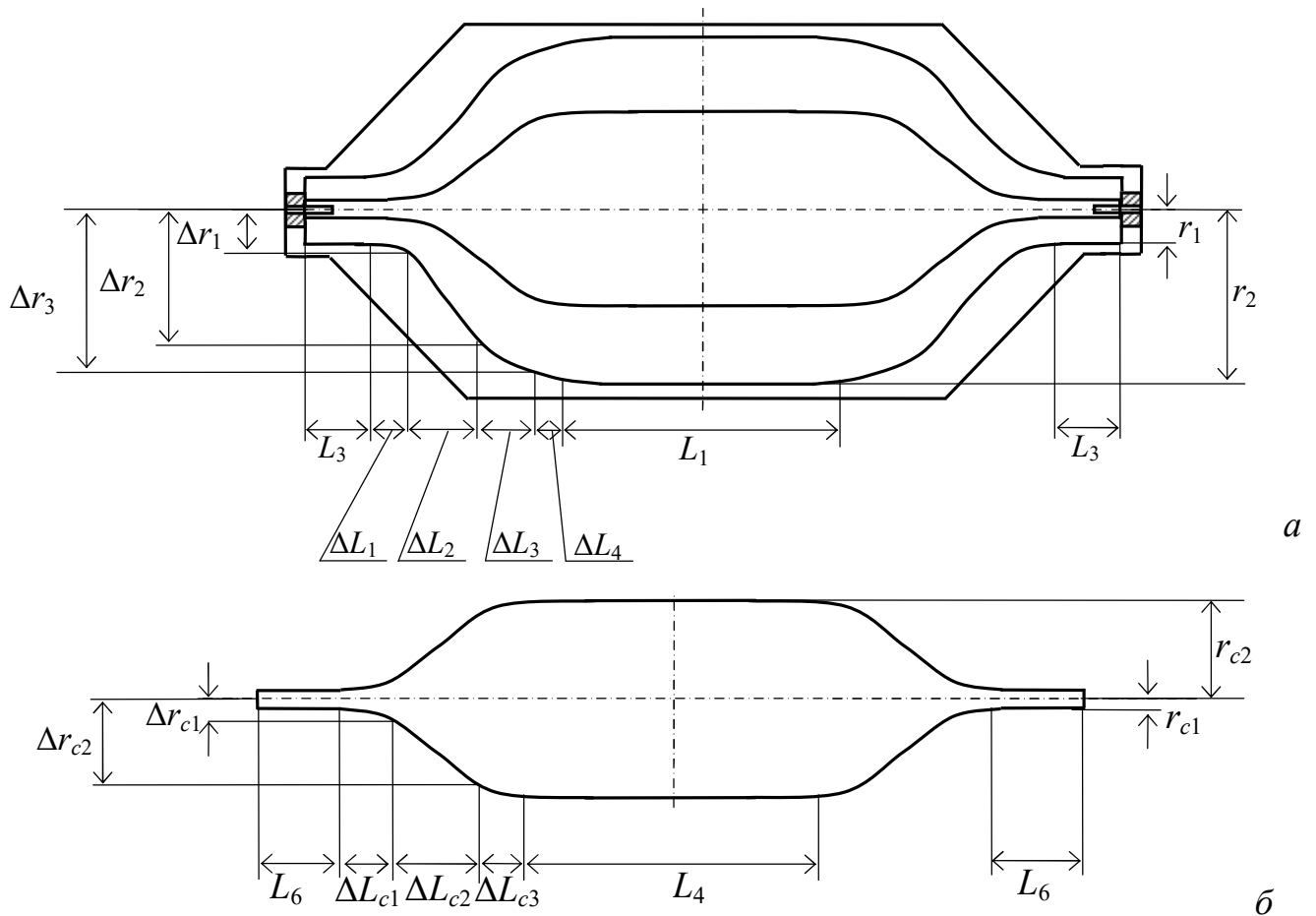


Рисунок 3.9 – Геометрические параметры внешнего (а) и центрального (б) проводников коаксиальной линии передачи с экспоненциальными согласующими переходами

При анализе модели коаксиальной линии с экспоненциальными согласующими переходами оптимизировались параметры, определяющие форму переходов: $\Delta L_{c1}, \dots, \Delta L_{c3}, \Delta L_1, \dots, \Delta L_4, \Delta r_{c1}, \Delta r_{c2}, \Delta r_1, \dots, \Delta r_3$. Полученные по результатам оптимизации значения сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Оптимальные значения геометрических параметров экспоненциальных согласующих переходов

$\Delta L_{c1}, \text{ мм}$	$\Delta L_{c2}, \text{ мм}$	$\Delta L_{c3}, \text{ мм}$	$\Delta L_1, \text{ мм}$	$\Delta L_2, \text{ мм}$	$\Delta L_3, \text{ мм}$
18	31,7	18	15	16,675	16,675
$\Delta L_4, \text{ мм}$	$\Delta r_{c1}, \text{ мм}$	$\Delta r_{c2}, \text{ мм}$	$\Delta r_1, \text{ мм}$	$\Delta r_2, \text{ мм}$	$\Delta r_3, \text{ мм}$
15	3,1	8,8	6,29	12,82	19,35

На рисунке 3.10 приведены вычисленные частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $|S_{11}|$ рассмотренных моделей коаксиальных камер с оптимизированными геометрическими параметрами.

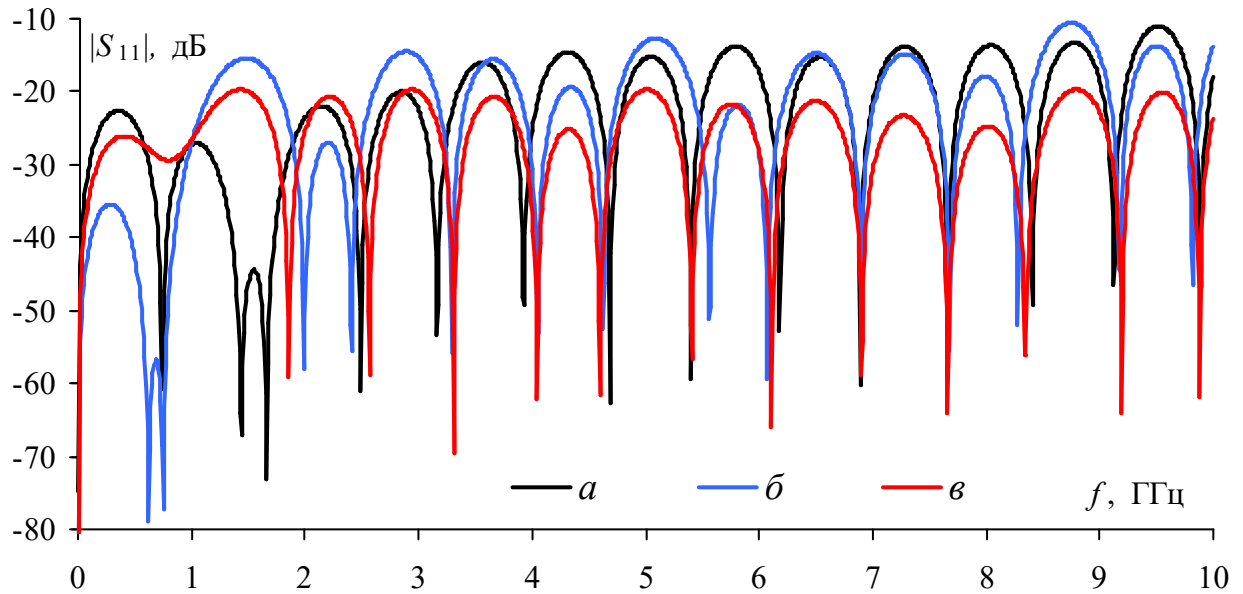


Рисунок 3.10 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ моделей коаксиальных камер с линейными (а), линейными смещенными (б) и экспоненциальными (в) согласующими переходами

Анализ частотных зависимостей S -параметров моделей выявил, что значение частотной зависимости $|S_{11}|$ для модели коаксиальной камеры с линейным согласующим переходом не превышает уровня минус 11 дБ. При этом на частоте 6 ГГц не наблюдается теоретического резонанса волны TE_{11} , соответствующего геометрическим параметрам проводников в регулярной части, что говорит о возможности использования рассчитанных размеров для дальнейшей разработки макета с диапазоном рабочих частот до 10 ГГц (рисунок 3.10 а). Модель с линейными смещенными согласующими переходами характеризуется удовлетворительным уровнем согласования в исследуемом диапазоне частот: $|S_{11}|$ менее минус 15 дБ, за исключением роста значений до минус 12,6 дБ на частоте 5,09 ГГц и до минус 10,5 дБ на частоте 8,74 ГГц (рисунок 3.10 б). При этом видно, что в исследуемом диапазоне частот модель коаксиальной линии с экспоненциальными переходами характеризуется

максимальным значением $|S_{11}|$ не более минус 20 дБ, что обеспечивает наилучшее согласование из рассмотренных вариантов моделей (рисунок 3.10 в).

3.3 Электродинамический анализ вариантов сборки коаксиальной камеры

На основе созданной модели коаксиальной камеры с экспоненциальными переходами, обеспечивающей наилучшее согласование с трактом 50 Ом, выполнена разработка твердотельных моделей коаксиальных камер на основе рекомендаций из стандартов по измерениям ЭЭ материалов.

Разработана твердотельная модель камеры согласно требованиям стандарта ASTM ES7 [25], имеющей неразрывный проводник и соединение корпуса которой осуществляется посредством резьбового соединения на контактных площадках. Для проведения измерения образец материала должен быть выполнен в форме диска заданной толщины со значениями внешнего и внутреннего радиусов, равных радиусам центрального и внешнего проводников (рисунок 3.11 а).

Разработана твердотельная модель коаксиальной камеры согласно стандарту ASTM D4935 [26], при измерениях в которой образец материала выполняют в форме цилиндра заданной толщины, устанавливаемого в зазоре между симметричными половинами конструкции, скрепляемыми диэлектрическими винтами (рисунок 3.11 б). Для вычисления ЭЭ при измерении согласно данному методу требуется проведение измерений S -параметров камеры с контрольным образцом, как показано на рисунке 3.11 в.

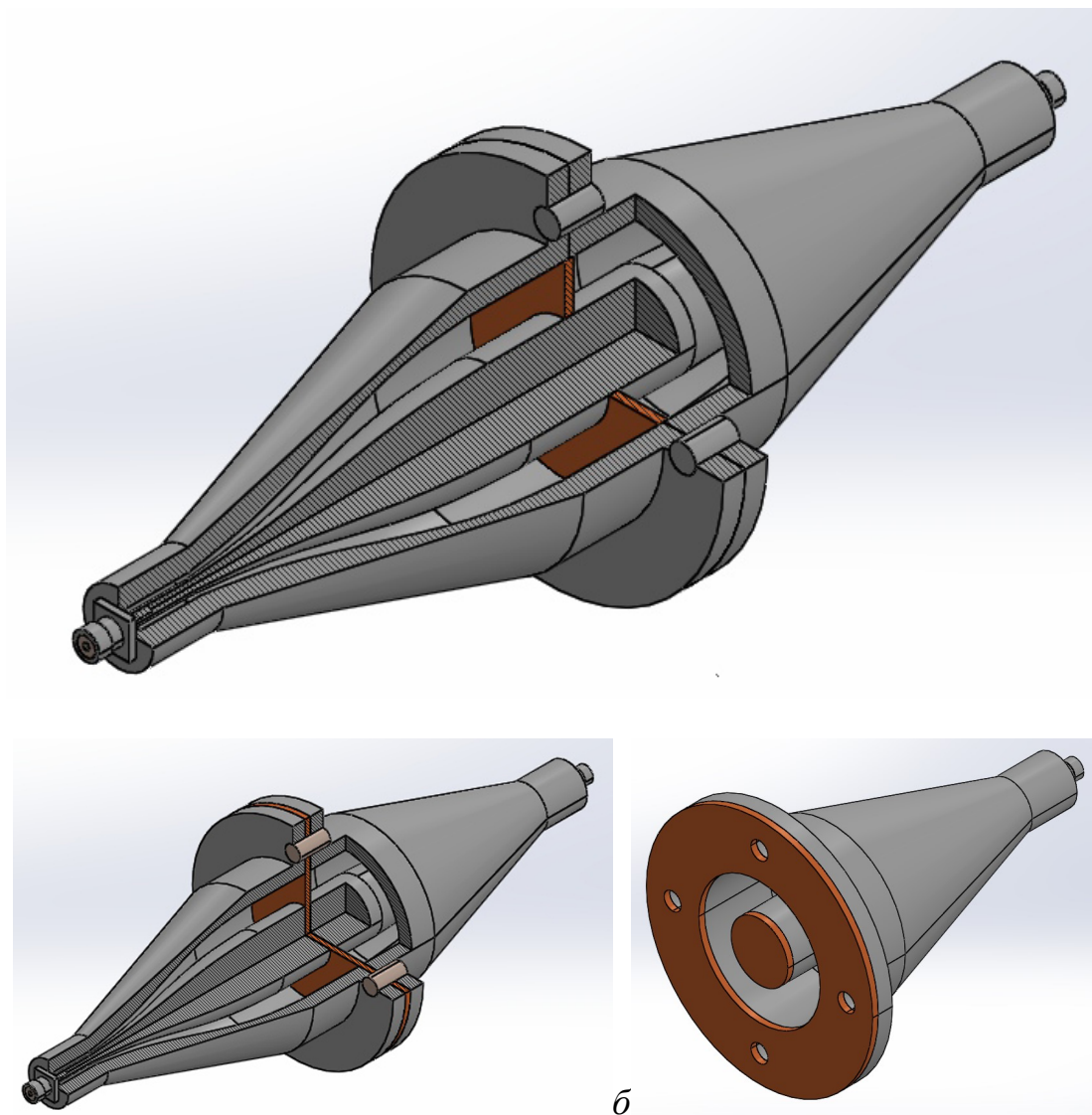


Рисунок 3.11 – Изометрические виды с местным разрезом моделей коаксиальных камер, разработанных согласно стандартам [25] (а) и [26] (б), форма контрольного образца для испытаний согласно [26] (в)

Выполнена разработка твердотельной модели коаксиальной камеры, основанной на совместном использовании элементов конструкций, описанных в стандартах [25, 26] (рисунок 3.12 а). Сборка конструкции камеры осуществляется посредством резьбового соединения на краях контактных площадок, при этом на конце одной половины центрального проводника выполнен цилиндрический выступ длиной $L_m = 10$ мм и радиусом $r_m = 8$ мм (рисунок 3.12 в), устанавливаемый в цилиндрический паз с теми же размерами на второй половине проводника. Для вычисления ЭЭ требуется измерение контрольного образца,

который располагают в зазорах цилиндрического выступа центрального и опорного проводников, как показано на рисунке 3.12 б.

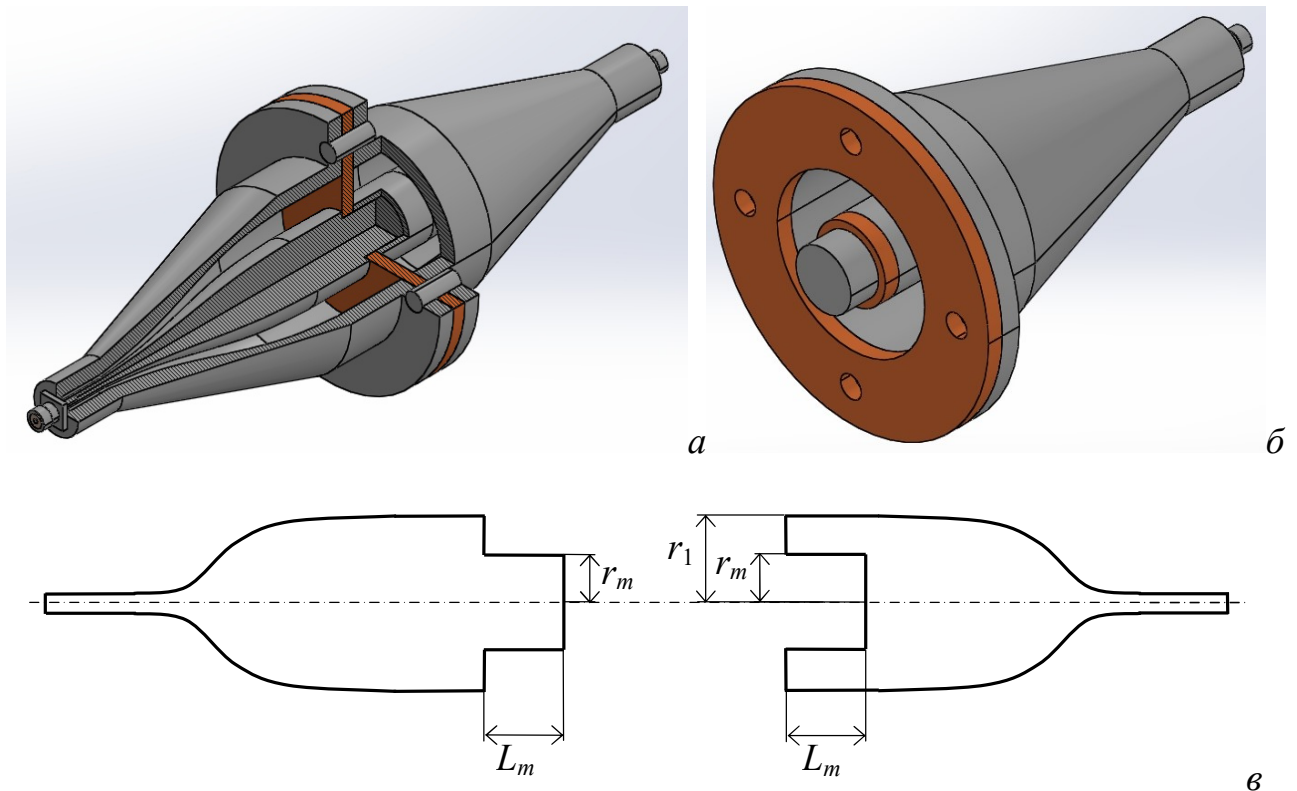


Рисунок 3.12 – Модель усовершенствованной коаксиальной камеры: изометрический вид с местным разрезом (а), форма контрольного образца (б) размеры соединения центрального проводника (в)

Выполнен вычислительный эксперимент по измерению ЭЭ композитного материала с помощью разработанных моделей камер для оценки влияния различных вариантов соединения элементов конструкции на результаты измерений. Для создания образца материала при моделировании использованы измеренные частотные зависимости относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей композитного экранирующего материала на основе гексаферрита Z-типа и силикона в качестве связующего, с массовой концентрацией наполнителя 80% [145]. Измеренные частотные зависимости для материала из [145] представлены на рисунке 3.13.

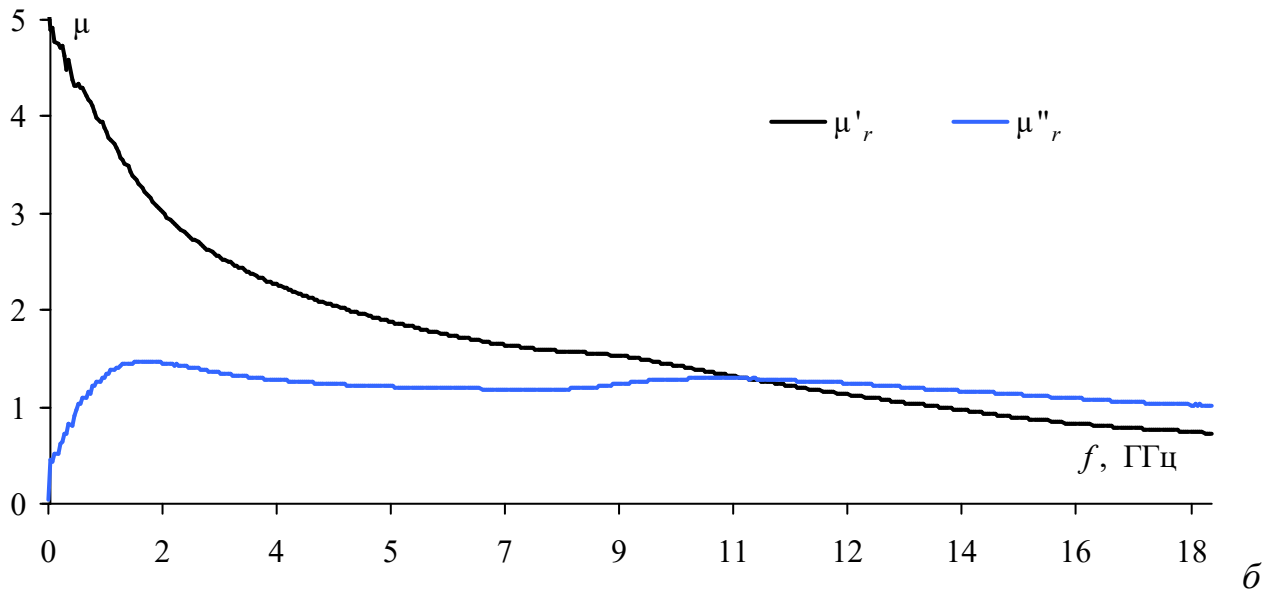
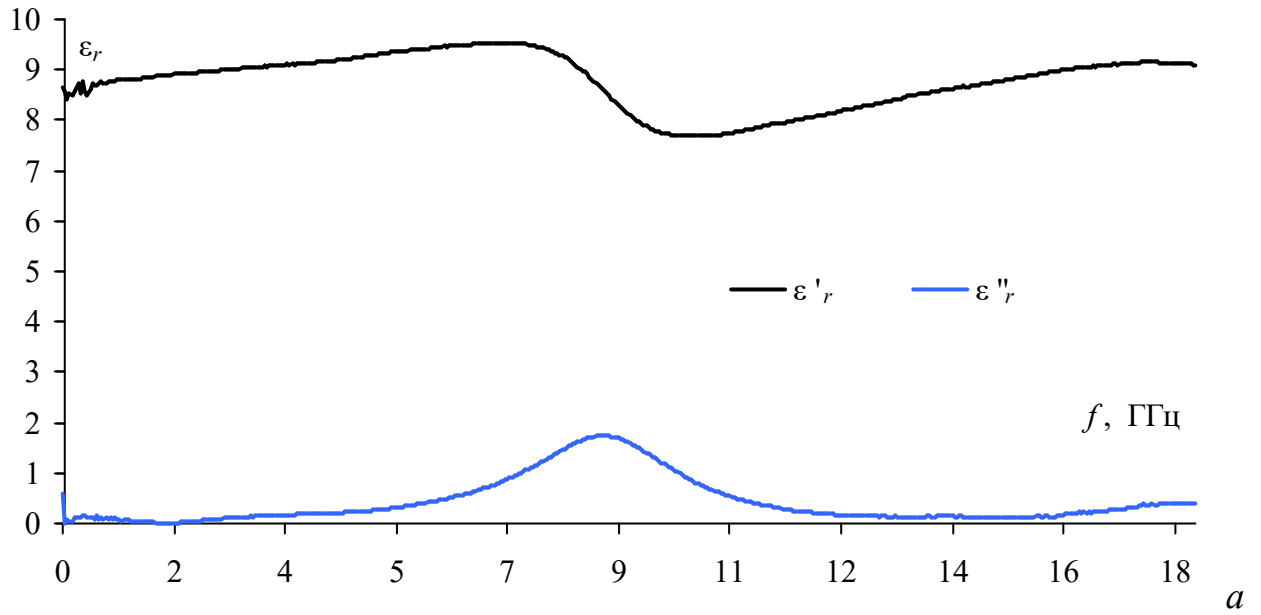


Рисунок 3.13 – Частотные зависимости вещественной и мнимой составляющих относительных диэлектрической ϵ (а) и магнитной μ (б) проницаемостей композитного материала

На рисунке 3.14 приведены вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ модели коаксиальной камеры согласно [25] без образца и при размещении образцов композитного материала с толщинами $t_o = 1$ и 2 мм в воздушном зазоре между проводниками, как показано на рисунке 3.11 а. Модель описывает идеализированный случай однородного заполнения пространства между проводниками камеры, при этом в исследуемом диапазоне частот $|S_{21}|$ находятся

на уровне 0 дБ, что говорит об отсутствии потерь при передаче ЭМВ с входа камеры на ее выход (рисунок 3.14 *а*). При размещении образца материала толщиной 1 мм наблюдается уменьшение значений $|S_{21}|$ от 0 до минус 4 дБ с ростом частоты (рисунок 3.14 *б*), а увеличение толщины образца материала до 2 мм приводит к уменьшению значений $|S_{21}|$ в 2 раза по сравнению со случаем $t_o = 1$ мм (рисунок 3.14 *в*).

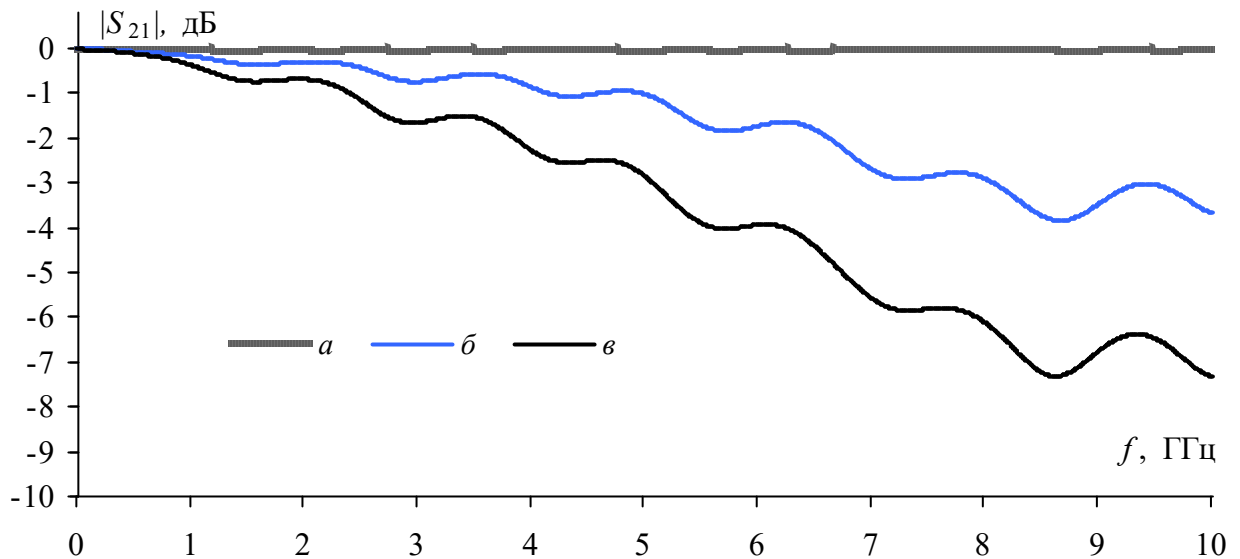


Рисунок 3.14 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ модели камеры согласно [25], вычисленные без образца (*а*) и при размещении образцов экранирующего материала с толщинами $t_o = 1$ (*б*) и 2 (*в*) мм

На рисунке 3.15 приведены вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ модели коаксиальной камеры, выполненной согласно требованиям стандарта [26] при размещении исходного и контрольного образцов композитного материала с толщинами $t_o = 1$ и 2 мм, как показано на рисунке 3.11 *б-в* соответственно. В диапазоне частот 0–200 МГц наблюдается рост частотных зависимостей $|S_{21}|$ от минус 18 дБ до минус 1,5 дБ, что вызвано отсутствием электрического контакта в центральном проводнике (рисунок 3.15 *а-г*), при этом на частотах от 1 ГГц наблюдается уменьшение значений $|S_{21}|$ за счет потерь из-за внесения материала (рисунок 3.15 *б, г*), что согласуется с частотными зависимостями,

полученными для модели с неразрывным центральным и опорным проводниками (рисунок 3.11 *а*).

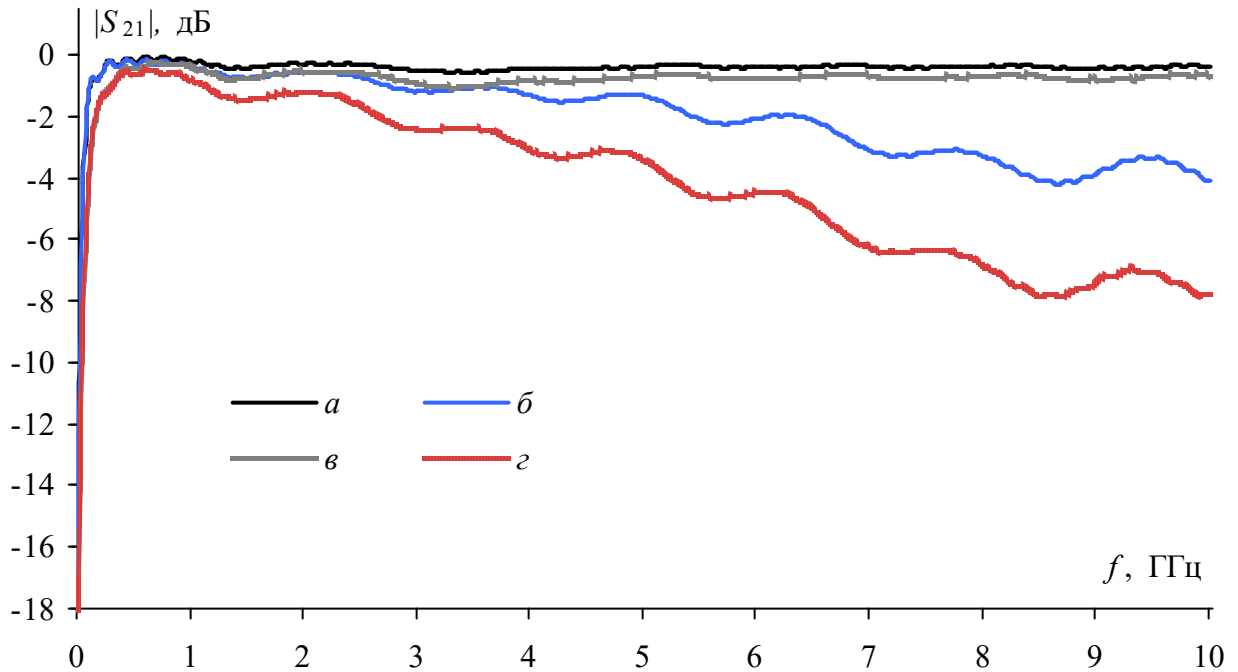


Рисунок 3.15 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ модели камеры согласно [26], вычисленные для контрольного (*а*) и исходного (*б*) образцов с $t_o = 1$ мм, для контрольного (*в*) и исходного (*г*) образцов с $t_o = 2$ мм

На рисунках 3.16 и 3.17 приведены вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ модели усовершенствованной коаксиальной камеры, при размещении исходного и контрольного образцов композитного материала с толщинами $t_o = 1$ и 2 мм, как показано на рисунках 3.12 *а, б* соответственно. Размещение образцов внутри камеры приводит к образованию неоднородности ввиду уменьшения радиуса центрального проводника, что совместно с уменьшением контактного сопротивления опорного проводника приводит к уменьшению зависимостей $|S_{21}|$ на частоте 0,56 ГГц до минус 0,5 дБ при толщине образцов $t_o = 1$ мм (рисунок 3.16) и до минус 1 дБ при $t_o = 2$ мм (рисунок 3.17). В диапазоне 0,56–4 ГГц для $t_o = 1$ мм зависимости убывают до минус 1,2 дБ при измерении контрольного образца (рисунок 3.16 *а*) и до минус 1,5 дБ для исходного образца (рисунок 3.16 *б*). Данный характер зависимости также наблюдается при

$t_o = 2$ мм – до минус 2,2 дБ (рисунок 3.17 *а*) и до минус 3 дБ (рисунок 3.17 *б*) соответственно.

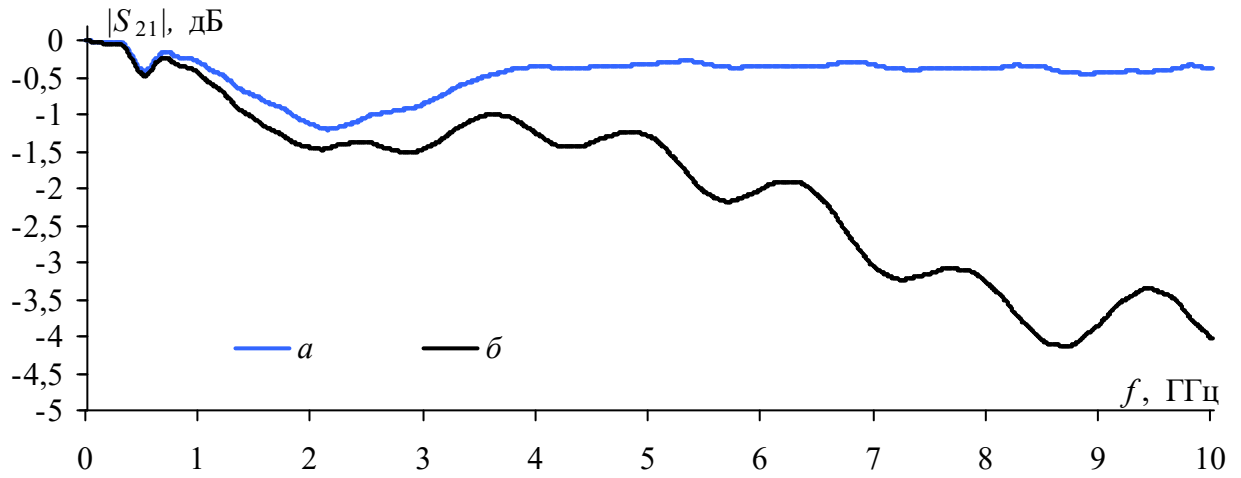


Рисунок 3.16 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ усовершенствованной модели камеры, вычисленные для контрольного (*а*) и исходного (*б*) образцов с $t_o = 1$ мм

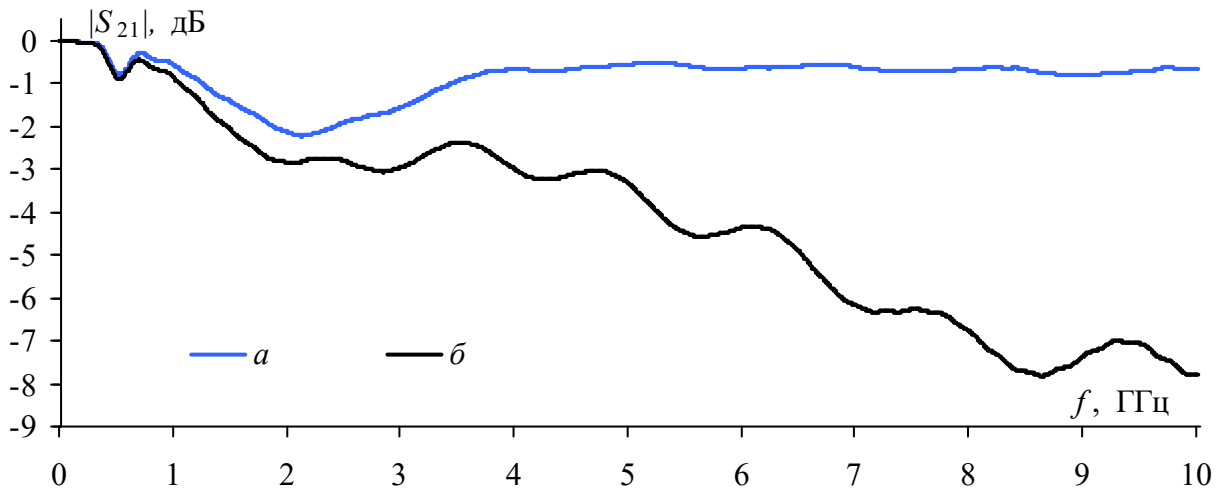


Рисунок 3.17 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ усовершенствованной модели камеры, вычисленные для контрольного (*а*) и исходного (*б*) образцов с $t_o = 2$ мм

На основе результатов вычислительного эксперимента и выражений (1.10) и (1.11) рассчитаны частотные зависимости ЭЭ образцов композитного материала. На рисунке 3.18 приведена частотная зависимость ЭЭ в диапазоне 0–1 ГГц образца материала с толщиной $t_o = 1$ мм, из которой видно, что результаты, полученные с помощью модели камеры, разработанной согласно требованиям

стандарта [26], расходятся с результатами для других моделей и являются некорректными на частотах до 0,2 ГГц.

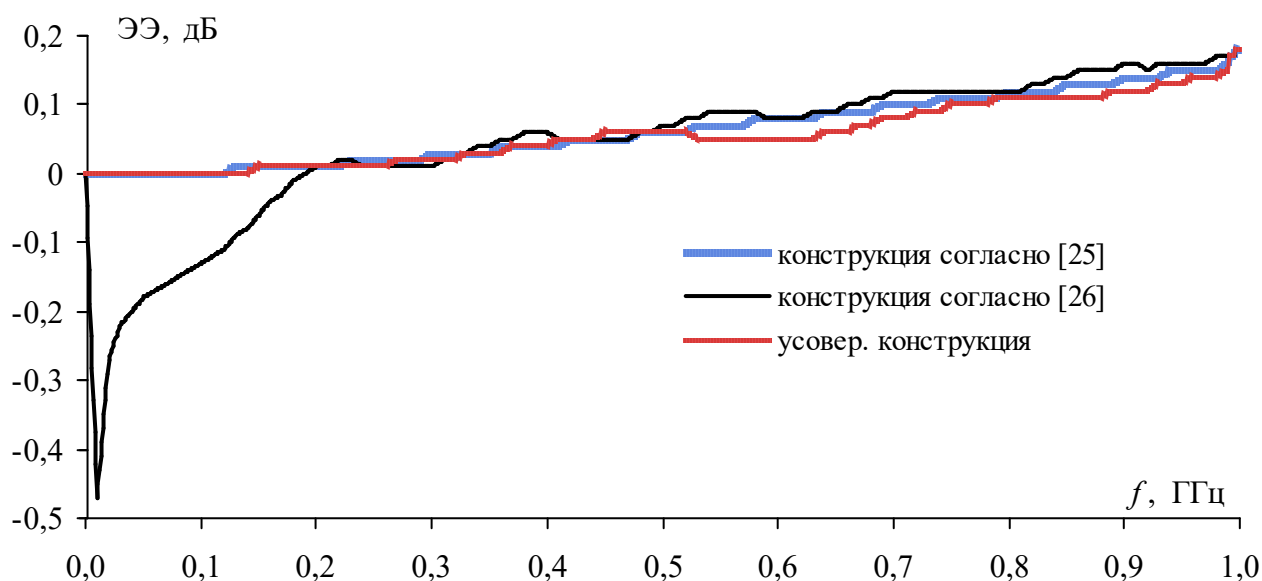


Рисунок 3.18 – Частотные зависимости ЭЭ в диапазоне частот 0–1 ГГц, вычисленные для образца с $t_o = 1$ мм с помощью разработанных моделей камер

Из полученных результатов наблюдается малый рост значений ЭЭ с увеличением частоты: максимальное значение ЭЭ образца с $t_o = 1$ мм составило 3,7 дБ (рисунок 3.19), а для $t_o = 2$ мм – до 7,8 дБ на частоте 8,76 ГГц (рисунок 3.20). При этом наблюдается сходимость частотных зависимостей ЭЭ, полученных при помощи моделей усовершенствованной и стандартизированных камер, что говорит о корректности разработанной конструкции и предлагаемого подхода к измерению ЭЭ на его основе.

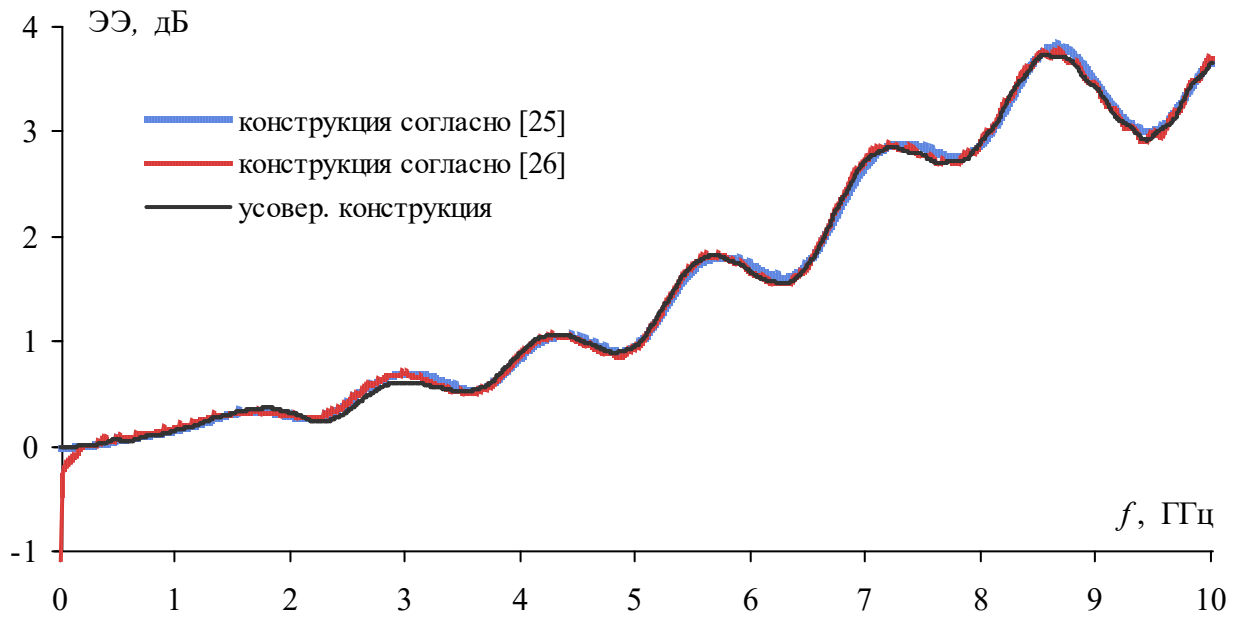


Рисунок 3.19 – Частотные зависимости ЭЭ в диапазоне частот 0–10 ГГц, вычисленные для образца с $t_o = 1$ мм с помощью разработанных моделей камер

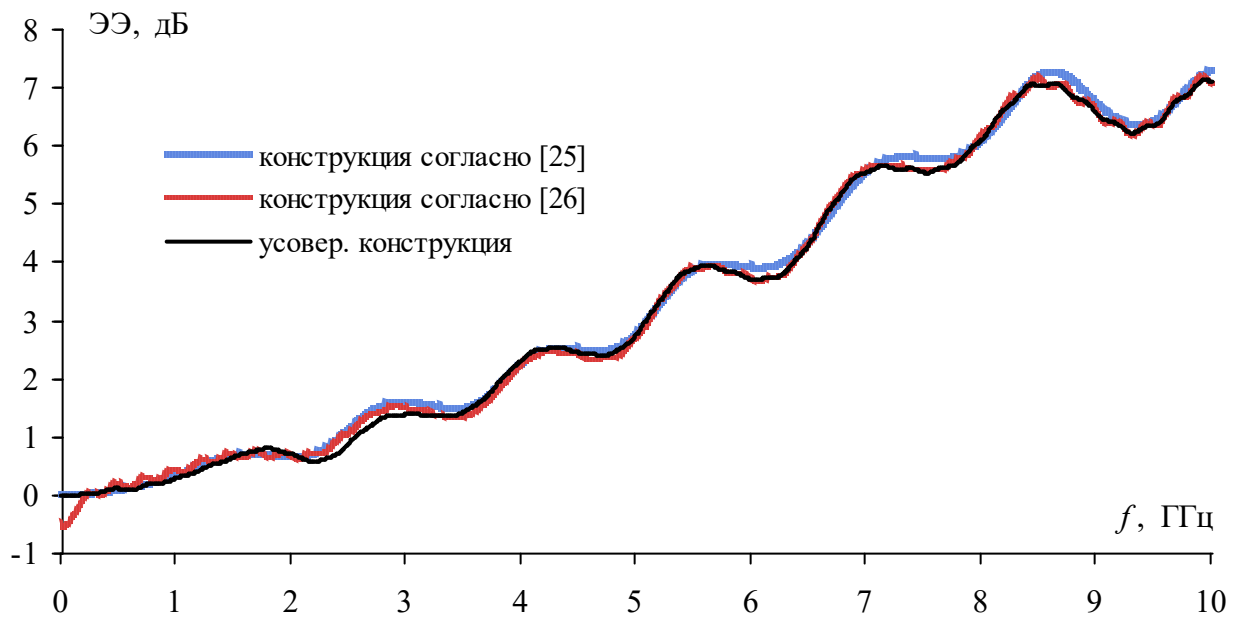


Рисунок 3.20 – Частотные зависимости ЭЭ в диапазоне частот 0–10 ГГц, вычисленные для образца с $t_o = 2$ мм с помощью разработанных моделей камер

Таким образом, разработанная твердотельная модель усовершенствованной коаксиальной камеры пригодна для изготовления лабораторного макета для измерения ЭЭ материалов в диапазоне частот до 10 ГГц. С помощью вычислительного эксперимента показано, что предложенный подход к измерению

позволяет упростить сборку конструкции и обработку образца материала по сравнению с конструкцией, описанной в [25]. При этом обеспечивается однородность заполнения измеряемым материалом пространства между проводниками, однако требуется проведение измерения контрольного образца. Стоит отметить, что при соединении центрального и внешнего проводников усовершенствованная конструкция представляет собой закрытую регулярную коаксиальную линию передачи, что позволяет применять ее также для измерений согласно требованиям стандарта [25].

3.4 Основные результаты раздела

Приведены результаты разработки коаксиальной камеры для измерения ЭЭ композитных экранирующих материалов в диапазоне частот до 10 ГГц. На основе результатов выполненного электродинамического анализа моделей и измерения макета регулярной коаксиальной линии предъявлены требования к согласованию усовершенствованной конструкции камеры. Выполнен анализ 3 вариантов согласующих переходов на основе аналитического и квазистатического расчетов, электродинамического моделирования и параметрической оптимизации с целью разработки конструкции с минимальным значением коэффициента отражения $|S_{11}|$ в диапазоне рабочих частот. На основе варианта, обеспечивающего наилучшее согласование ($|S_{11}|$ менее минус 20 дБ), выполнен анализ вариантов сборки коаксиальной камеры согласно требованиям стандартов [25, 26]. Выполнен эксперимент по вычислению ЭЭ композитного материала с помощью твердотельных моделей камер с различными вариантами сборки конструкции. Разработана усовершенствованная конструкция коаксиальной камеры, позволяющая проводить измерения ЭЭ материалов в диапазоне частот до 10 ГГц. При этом предложенный подход к измерению позволяет упростить сборку конструкции камеры при измерении образца материала по сравнению с методиками, описанными в стандарте [25].

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

В данном разделе представлены результаты разработки аналитической модели для предварительной оценки распределения амплитуд напряженности электрического E -поля в эффективной рабочей зоне РК:

– обобщены аналитические выражения для разработки модели, позволяющей вычислять напряженность E -поля в заданной точке наблюдения внутри РК и основанной на представлении ЭМП в виде суперпозиции возбуждаемых внутри корпуса РК собственных резонансных типов волн [146].

– выполнены разработка [147], программная реализация и тестирование [148, 149] математической модели, с помощью которой построены и проанализированы две геометрические модели РК, применимые для разработки и создания полнофункциональной РК для испытаний малогабаритных и крупногабаритных РЭС [150].

– выполнено сравнение частотных зависимостей среднеквадратического отклонения компонент напряженности E -поля геометрической модели РК, вычисленных с помощью разработанной математической модели и электродинамического анализа, которое выявило удовлетворительную сходимость полученных результатов.

4.1 Разработка модели

Из приведенного в п. 1.4 обзора следует, что на ранних этапах разработки РК актуально выполнение предварительных оценок распределения ЭМП на заданных частотах. Для решения этой задачи разработана аналитическая модель РК, которая включает в себя вычисление резонансных частот возбуждаемых типов волн и соответствующих им прямоугольных компонент напряженности E -поля, сумма которых определяет распределение E -поля внутри корпуса РК.

Резонансные частоты возбуждаемых типов волн в РК могут быть вычислены по выражению для прямоугольного резонатора [151]

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}, \quad (4.1)$$

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 как функция от вычисленной частоты резонанса типа волны f_{mnp} и добротности РК $Q(f)$ [151]

$$I(f, f_{mnp}) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(f) \left(\frac{f}{f_{mnp}} - \frac{f_{mnp}}{f}\right)^2}}. \quad (4.2)$$

Характеристика добротности Q определяет отношение накопленной внутри РК энергии ЭМВ к рассеянной за цикл перемешивания волн. Значение Q в диапазоне высоких частот может быть вычислено как [89]

$$Q = \frac{1}{Q_w^{-1} + Q_{Rx}^{-1} + Q_{Tx}^{-1}}. \quad (4.3)$$

В выражении (4.3) составляющая добротности Q_w , определяемая потерями в результате многократных отражений ЭМВ от внутренних стен корпуса РК, вычисляется как [89]

$$Q_w = \frac{3}{2} \frac{V}{\mu_r S \delta_w} \frac{1}{1 + \frac{3\pi}{8k} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{d}\right)}, \quad (4.4)$$

где V – внутренний объем экранирующего корпуса РК, S – площадь стен внутри корпуса, μ_r – относительная магнитная проницаемость воздуха, δ_w – толщина скин-слоя металла, k – волновое число.

Добротности Q_{Rx} и Q_{Tx} , определяемые потерями в приемной (R_x) и передающей (T_x) антеннах, могут быть найдены по выражениям [89]

$$Q_{Rx} = \frac{16\pi^2 V f^3}{m_a c^3}, \quad (4.5)$$

$$Q_{Tx} = \frac{8\pi^2 V f^3}{m_a c^3}, \quad (4.6)$$

где m_a – коэффициент согласования антенны.

Предполагая, что ЭМВ распространяется вдоль оси z , компоненты напряженности E -поля в декартовой системе координат внутри РК для TE - и TM -волн могут быть найдены по выражениям [152]

$$E_{x_{mnp}}^{TE^z} = \frac{-j2\pi f_{mnp} \mu k_y H_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z), \quad (4.7)$$

$$E_{y_{mnp}}^{TE^z} = \frac{-j2\pi f_{mnp} \mu k_x H_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z), \quad (4.8)$$

$$E_{z_{mnp}}^{TE^z} = 0, \quad (4.9)$$

$$E_{x_{mnp}}^{TM^z} = \frac{-k_x k_z E_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z), \quad (4.10)$$

$$E_{y_{mnp}}^{TM^z} = \frac{-k_y k_z E_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z), \quad (4.11)$$

$$E_{z_{mnp}}^{TM^z} = E_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z). \quad (4.12)$$

где $k_x = \frac{m\pi x}{a}$, $k_y = \frac{n\pi y}{b}$, $k_z = \frac{p\pi z}{d}$, $k_{mnp} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$, μ – абсолютная магнитная проницаемость, E_0 – напряженность электрического поля, $H_0 = E_0 / c\mu$ – напряженность магнитного поля.

Результирующее выражение для вычисления E -поля на частоте f определяется как сумма полей, возбуждаемых каждым резонансным типом волны (4.1) с соответствующим им амплитудным коэффициентом (4.2), в пределах диапазона $f \pm \Delta f$ (где $\Delta f = 100f / Q(f)$). С учетом выражений (4.3)–(4.12) оно примет вид

$$E_i(f, x, y, z) = \sum_{f_{mnp} \in f \pm \Delta f} I(f, f_{mnp}) \left(E_{x_{mnp}}^{TM^i} + E_{x_{mnp}}^{TE^i} \right), \quad (4.13)$$

где i – индекс, определяющий компоненту напряженности поля в декартовой системе координат (x , y или z).

В качестве источника воздействия в модели используется бесконечно малый изотропный излучатель, помещенный внутрь корпуса РК. Для учета влияния расположения излучателя на распределение ЭМП используются коэффициенты [153]

$$C_{x_{mnp}}^{TM^z} = I(f, f_{mnp}) \frac{-k_x k_z}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos(k_x x_e) \sin(k_y y_e) \sin(k_z z_e), \quad (4.14)$$

$$C_{x_{mnp}}^{TE^z} = I(f, f_{mnp}) \frac{-j\omega_{mnp} \mu k_y}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos(k_x x_e) \sin(k_y y_e) \sin(k_z z_e), \quad (4.15)$$

где x_e , y_e , z_e – координаты местоположения излучателя внутри корпуса. Таким образом, выражение для расчета компонент напряженности электрического поля с учетом (4.14)–(4.15) примет вид

$$E_i(f, x, y, z) = \sum_{f_{mnp} \in f \pm \Delta f} \left(C_{x_{mnp}}^{TM^i} E_{x_{mnp}}^{TM^i} + C_{x_{mnp}}^{TE^i} E_{x_{mnp}}^{TE^i} \right). \quad (4.16)$$

Механическое перемешивание типов волн является наиболее распространенным способом изменения граничных условий в РК. В реальных РК изменение пространственного положения механического смесителя приводит к сдвигу резонансных частот каждого типа волны. В разрабатываемой модели необходимо учитывать корреляцию между распределением ЭМП при различных позициях смесителя. Для имитации вращения смесителя в модели выполняется вычисление резонансных частот для каждого типа волны при M -положении смесителя по выражению [154]

$$f_{mnp}' = f_{mnp} + \Delta f_u. \quad (4.17)$$

где Δf_u – сдвиг резонансной частоты моды mnp , вызванный изменением граничных условий, $u = 1, \dots, M$ – положение смесителя.

Выполнена разработка алгоритма для программной реализации аналитической модели. На начальном этапе производится ввод исходных данных: габаритов корпуса, координат излучателя, границ анализируемого частотного диапазона, числа частотных точек и координат мониторов E -поля. Далее вычисляется массив частотных точек и частотной зависимости добротности РК согласно выражениям (4.3)–(4.6) (рисунок 4.1).

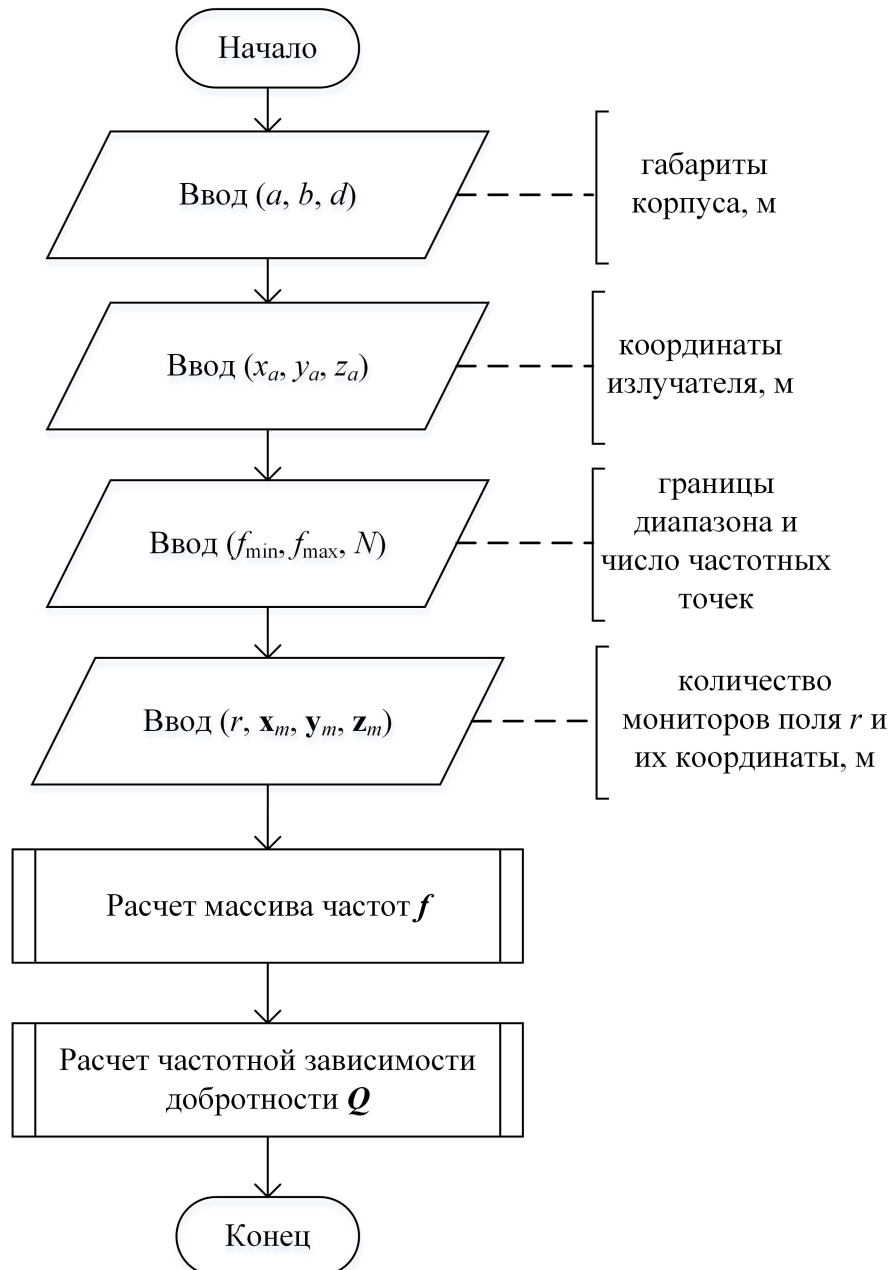


Рисунок 4.1 – Алгоритм ввода начальных данных

Далее вводятся параметры перемешивания типов волн, определяющие изменение граничных волн распространения ЭМВ в РК, которое реализовано

посредством изменения положения источника воздействия, имитируя работу РК с электрическим типом перемешивания волн. Имитация работы РК с механическим смесителем может быть реализована посредством внесения сдвига резонансных частот возбуждаемых типов волн согласно (4.17). Далее выполняется расчет компонент E -поля согласно (4.7)–(4.16) для монитора поля ν на частоте f_k при граничных условиях u , после чего происходит сохранение результатов вычисления в формате электронной таблицы. Полный алгоритм программной реализации модели приведен на рисунке 4.2.

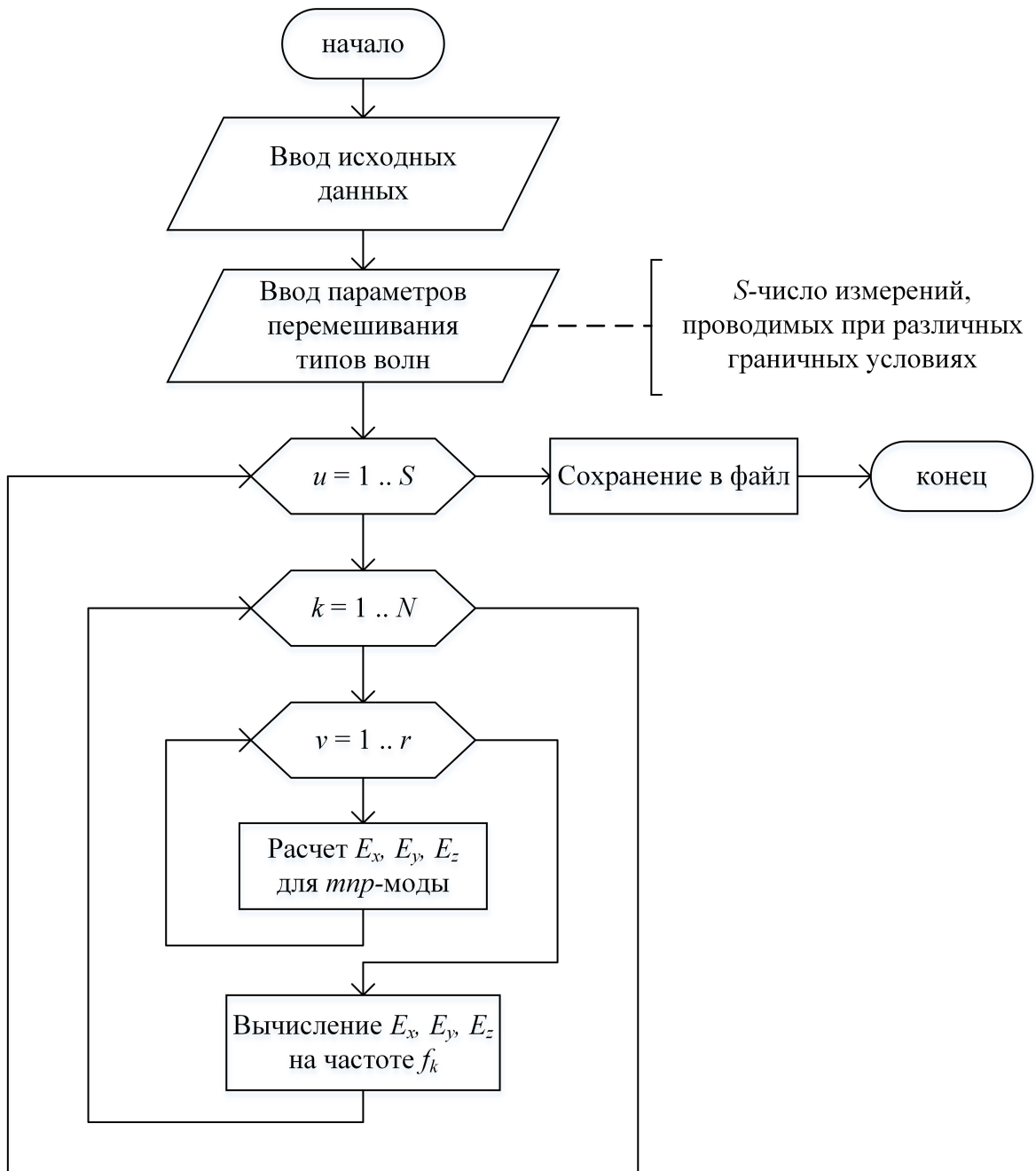


Рисунок 4.2 – Алгоритм работы модели

В качестве инструментария для программной реализации модели рассмотрена система математических вычислений GNU Octave [155]. Предварительное тестирование модели, реализованной в данной системе, выявило высокие требования к вычислительным ресурсам, необходимым для вычисления частотных зависимостей напряженности электрического поля E при значениях шага свипирования по частоте порядка 1 МГц [148]. Для ускорения вычислений модель реализована на языке C++ с применением библиотек из кроссплатформенного инструментария Qt [156] для организации многопоточных вычислений [147].

4.2 Тестирование программной реализации модели

Для тестирования программной реализации модели выбран экранированный корпус с габаритами $2,4 \times 0,9 \times 1,8$ м³. Согласно руководству ESA [89], однородность ЭМП в РК оценивается с помощью прямых измерений напряженности E -поля в восьми точках, определяющих границы рабочего объема. При этом датчики напряженности электрического поля должны быть расположены на расстоянии не менее $\lambda_{нгр} / 2$ ($\lambda_{нгр}$ – нижняя граничная длина волны РК) от стен корпуса, смесителей и антенн. Поэтому, нижняя граничная частота $\lambda_{нгр}$ РК выбрана равной 600 МГц. На рисунках 4.3 и 4.4 приведены вычисленные частотные зависимости добротности РК и количества возбуждаемых типов волн в 45 частотных точках в диапазоне 600–2000 МГц.

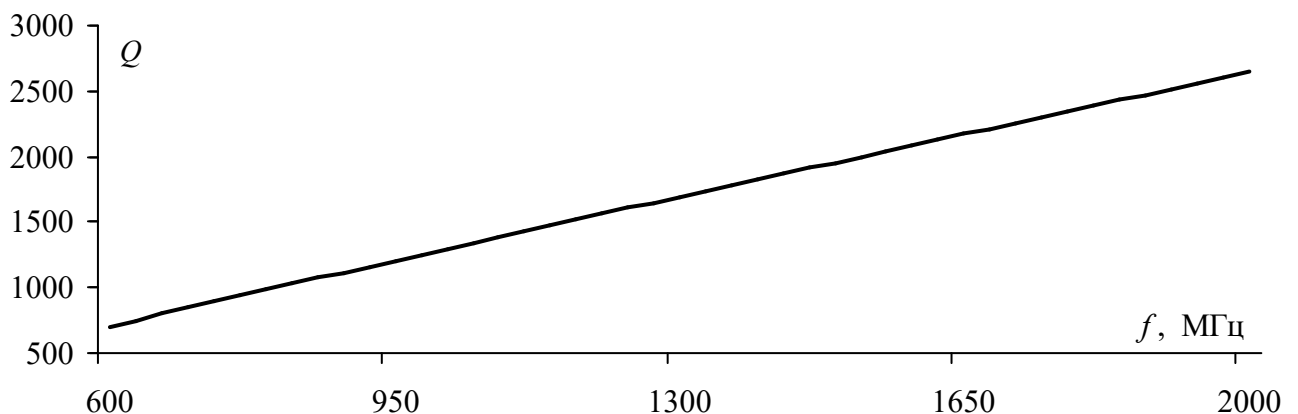


Рисунок 4.3 – Частотная зависимость добротности Q РК

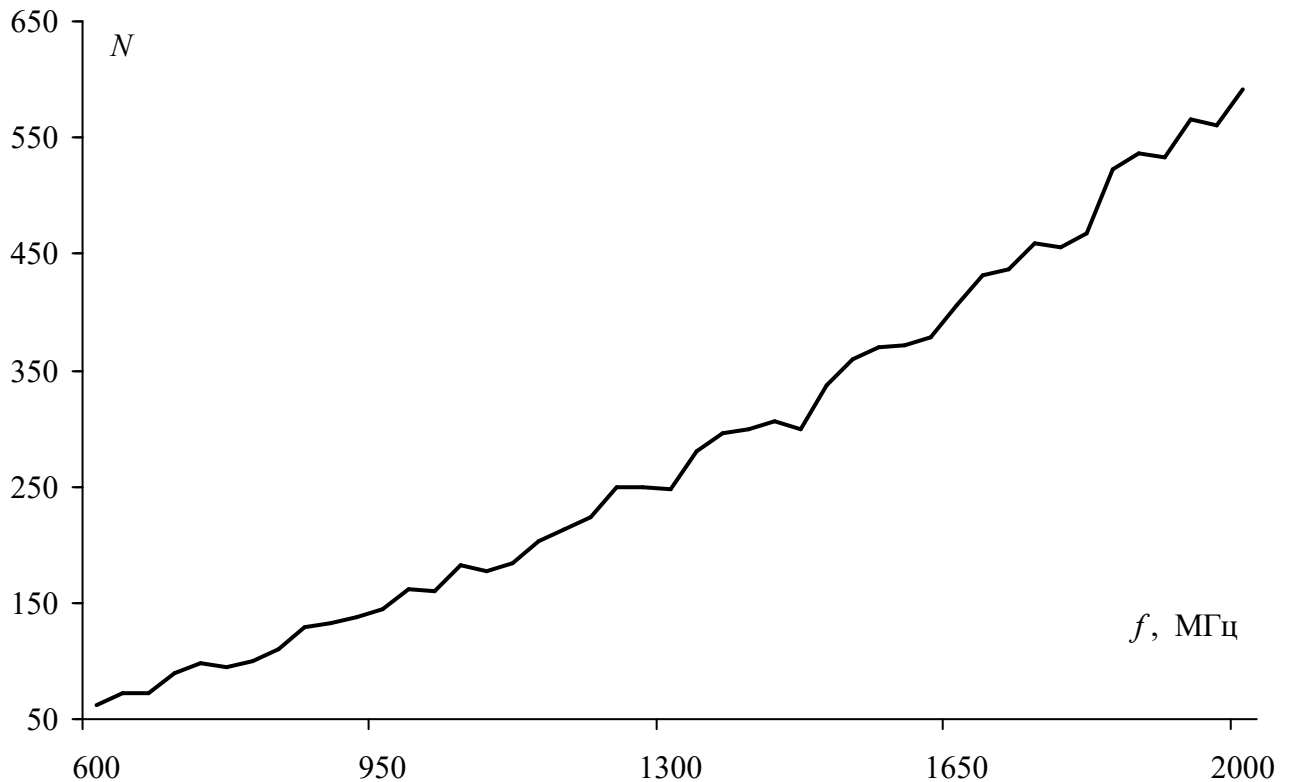


Рисунок 4.4 – Частотная зависимость количества возбуждаемых типов волн в РК

Характеристика добротности Q определяет отношение накопленной внутри РК энергии ЭМВ к рассеянной за цикл перемешивания типов волн. Для малогабаритных РК величина Q составляет $\approx 10^3$ на частотах до 1 ГГц и более 10^3 на более высоких частотах [157], что соответствует полученной частотной зависимости (рисунок 4.3). Из [158] известно, что для достижения однородного распределения ЭМП требуется возбуждение не менее 60 типов волн на заданной частоте. Как видно из рисунка 4.4, на нижней граничной частоте $f_{нгр} = 600$ МГц возбуждается 62 типа волн с дальнейшим увеличением их числа с ростом частоты, что удовлетворяет требуемым условиям [89].

На основе выбранных значений геометрических параметров экранированного корпуса РК и $f_{нгр}$ определена рабочая зона РК $0,9 \times 0,3 \times 1,0$ м³, координаты изотропного излучателя $x_a = 0,2$ м; $y_a = 0,4$ м; $z_a = 0,2$ м. Координаты мониторов E -поля сведены в таблицу 4.1. Изменение граничных условий распространения ЭМВ выполнено с помощью изменения координат изотропного

излучателя по ломаной и линейной траекториям внутри корпуса РК (рисунок 4.5).

Координаты изотропного излучателя сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.1 – Координаты мониторов E -поля в модели РК с $f_{нзр} = 600$ МГц

Номер монитора поля	x , м	y , м	z , м
1	1,1	0,3	1,4
2	1,1	0,3	0,4
3	1,1	0,6	1,4
4	1,1	0,6	0,4
5	2	0,3	1,4
6	2	0,3	0,4
7	2	0,6	1,4
8	2	0,6	0,4

Таблица 4.2 – Координаты изотропного излучателя в модели РК с $f_{нзр} = 600$ МГц

Положение антенны	Траектория №1 – ломаная			Траектория №2 – линейная		
	x	y	z	x	y	z
1	0,08	0,74	1,25	0,3	0,1	0,2
2	0,12	0,78	1,62	0,3	0,1425	0,28875
3	0,44	0,7	1,5	0,3	0,185	0,3775
4	0,54	0,12	1,5	0,3	0,27	0,555
5	0,14	0,1	1,11	0,3	0,355	0,7325
6	0,02	0,4	0,95	0,3	0,44	0,91
7	0,24	0,7	0,4	0,3	0,525	1,0875
8	0,2	0,1	0,2	0,3	0,61	1,265
9	0,58	0,08	0,32	0,3	0,695	1,4425
10	0,54	0,02	1,01	0,3	0,78	1,62

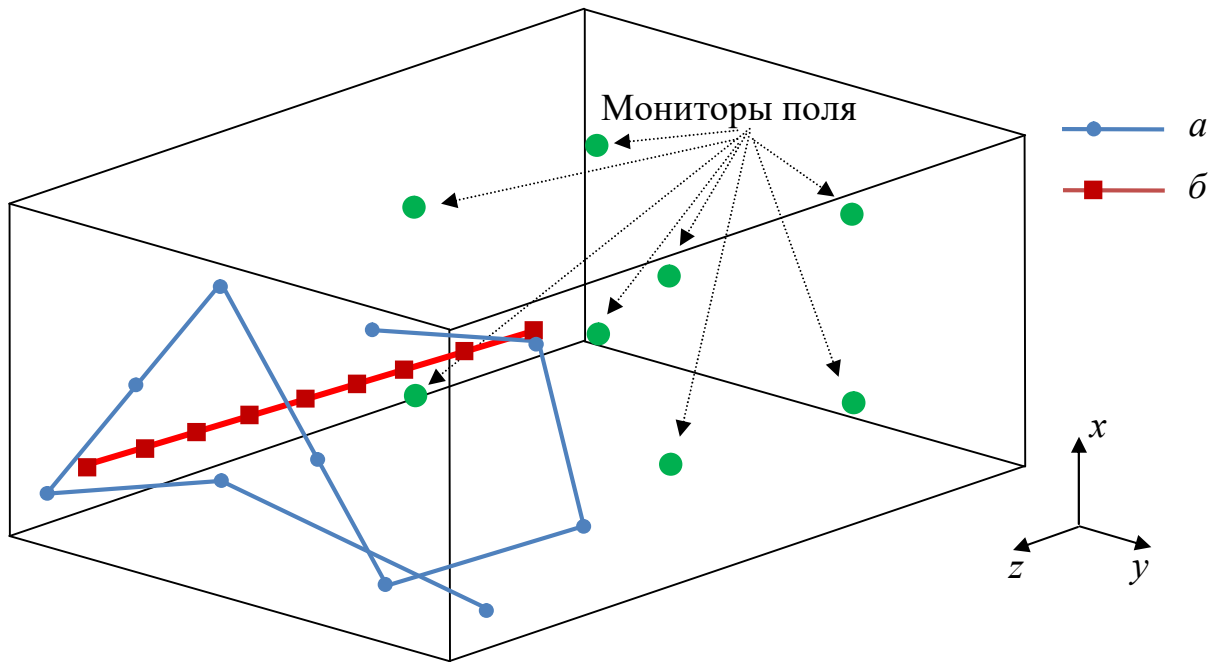


Рисунок 4.5 – Ломаная (*a*) и линейная (*b*) траектории перемещения изотропного излучателя и расположение мониторов поля

Вычислено среднеквадратическое отклонение для каждой компоненты *E*-поля в рабочей зоне РК для рассмотренных вариантов (линейного и ломаного) перемещения антенны согласно (1.27)–(1.32). На рисунках 4.6 и 4.7 приведено сравнение вычисленных частотных зависимостей среднеквадратического отклонения компонент *E*-поля при перемещении антенны по обеим траекториям с максимально допустимым уровнем согласно требованиям стандарта [30].

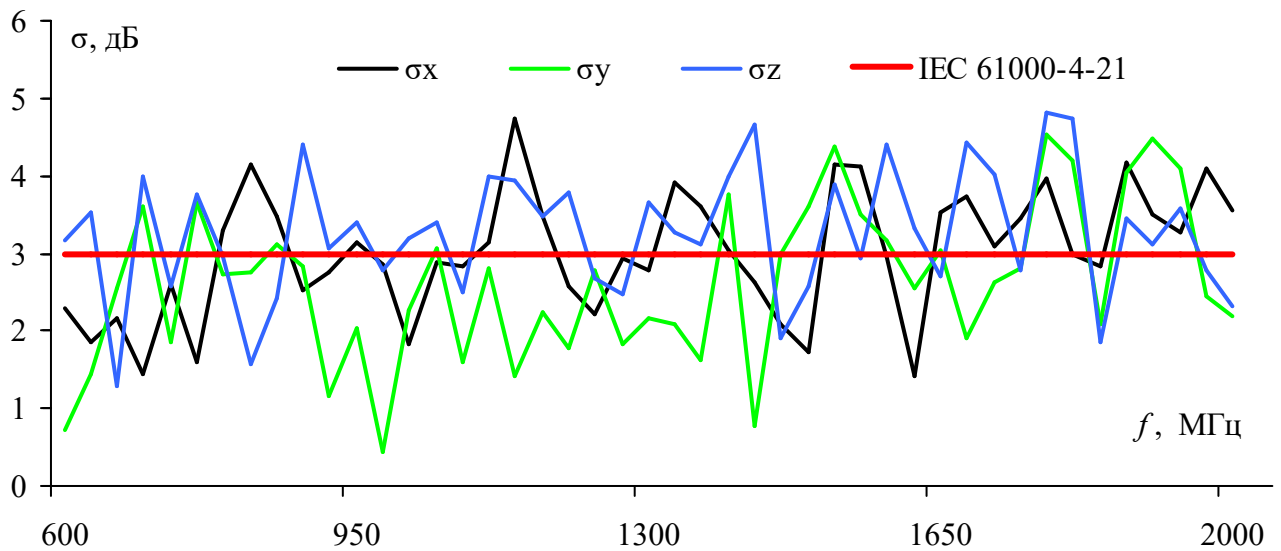


Рисунок 4.6 – Частотные зависимости среднеквадратического отклонения значений компонент E -поля при перемещении антенны по ломаной траектории

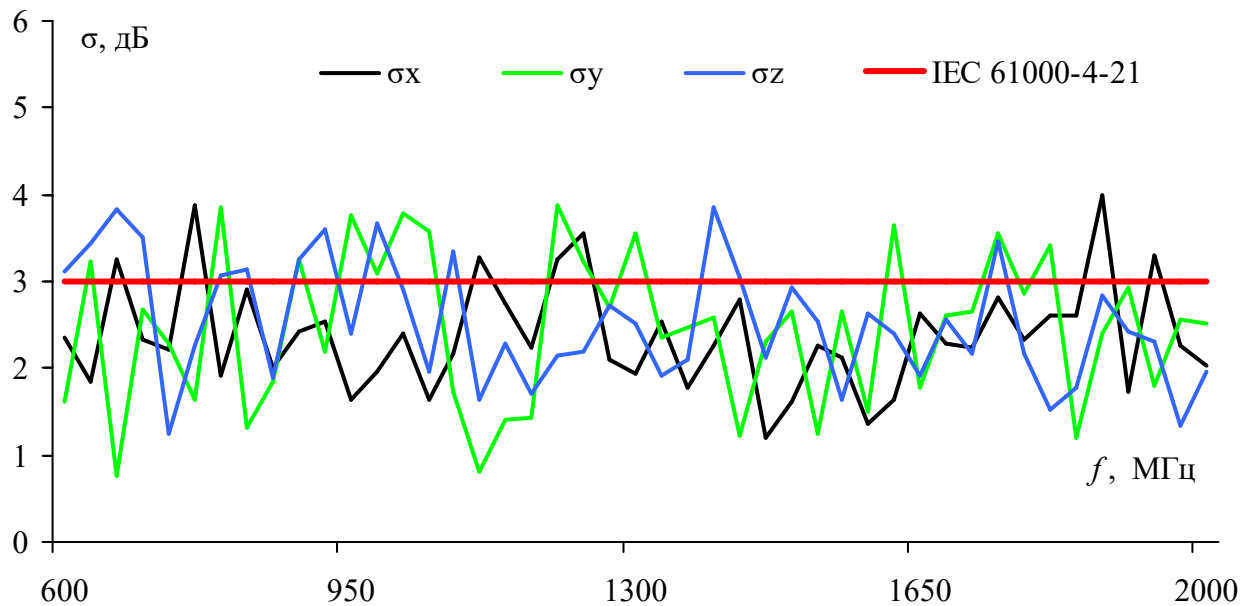


Рисунок 4.7 – Частотные зависимости среднеквадратического отклонения значений компонент E -поля при перемещении антенны по линейной траектории

При перемещении антенны по ломаной траектории (рисунок 4.6) максимальное значение σ составляет 4,8 дБ, что превышает установленный

стандартом [30] предел на 1,8 дБ. Однако, при линейной траектории (рисунок 4.7) максимальное значение σ превышает предельное значение 3 дБ на 1 дБ в исследуемом диапазоне частот. При этом объем рабочей зоны РК составил $0,9 \times 0,3 \times 1,0 \text{ м}^3$.

Из выполненного в п. 1.2 обзора следует, что испытания компонентов, узлов и малогабаритных РЭС в целом, в диапазоне частот до 3 ГГц проводят преимущественно в испытательных устройствах на основе линии передачи, в связи с чем выполнена аналогичная разработка РК с $f_{нгр} = 3 \text{ ГГц}$ и объемом рабочей зоны $0,25 \times 0,25 \times 0,45 \text{ м}^3$. Исходя из требования обеспечения минимального расстояния между рабочей зоной и металлическими объектами внутри РК (не менее $\lambda_{нгр} / 2$) вычислены геометрические параметры корпуса РК: $a = 0,55 \text{ м}$; $b = 0,74 \text{ м}$; $d = 1,2 \text{ м}$. Координаты точек наблюдения сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Координаты точек наблюдения E -поля в модели РК с $f_{нгр} = 3 \text{ ГГц}$

Номер монитора поля	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$
1	0,12	0,49	0,16
2	0,12	0,24	0,16
3	0,37	0,49	0,16
4	0,37	0,24	0,16
5	0,37	0,49	0,61
6	0,37	0,24	0,61
7	0,12	0,49	0,61
8	0,12	0,24	0,61

Далее выполнен расчет частотных зависимостей добротности (рисунок 4.8) и количества резонансных типов волн (рисунок 4.9). Из представленных зависимостей видно, что в рассматриваемом диапазоне частот добротность Q РК превышает значение 10^4 , что говорит о малых значениях потерь, определяемых отражениями ЭМВ внутри корпуса, при этом в исследуемом диапазоне частот число возбуждаемых типов волн N удовлетворяет требованиям [89].

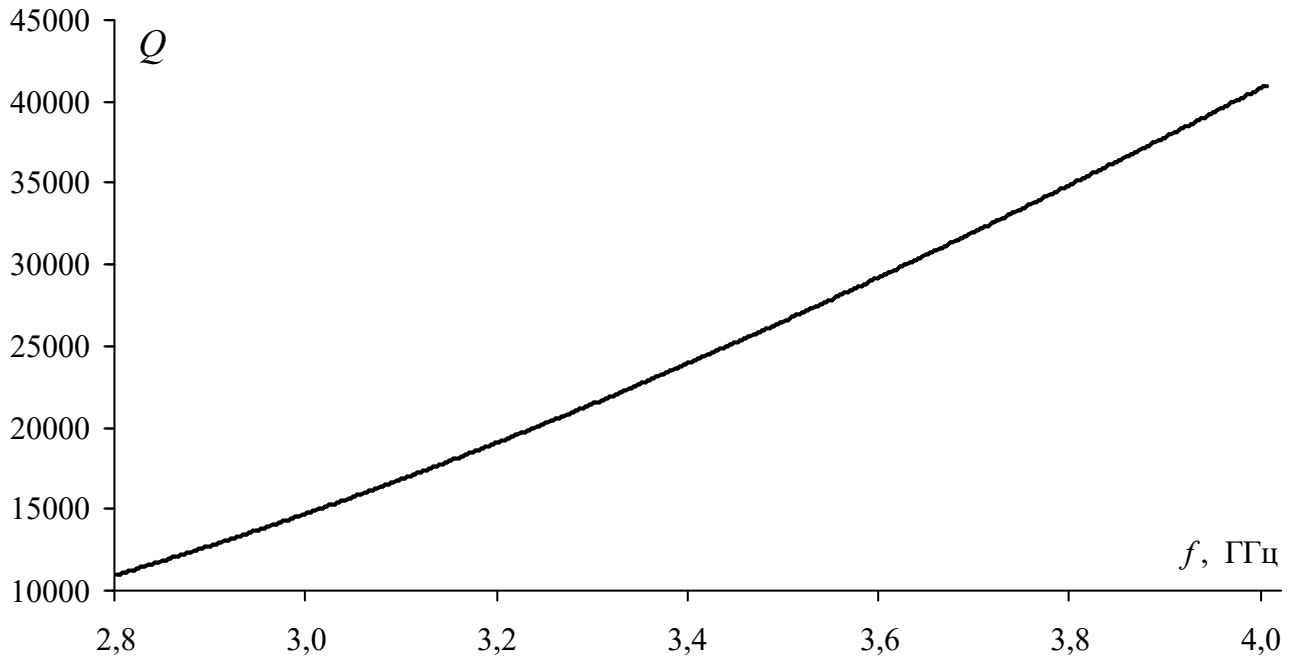


Рисунок 4.8 – Частотная зависимость добротности Q РК при $f_{нгр} = 3$ ГГц

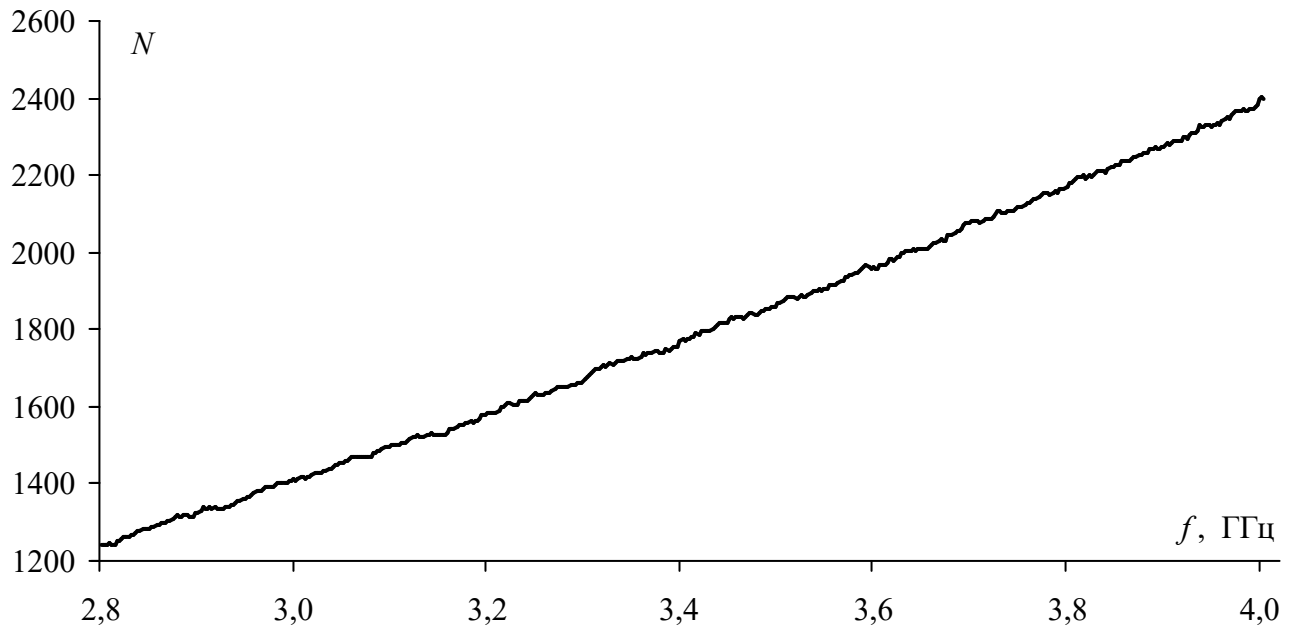


Рисунок 4.9 – Частотная зависимость числа возбуждаемых типов волн

в РК с $f_{нгр} = 3$ ГГц

Анализ распределения E -поля в рабочей зоне выполнен посредством имитации электрического перемешивания типов волн путем изменения координат передающей антенны по линейной траектории. Координаты положения антенны приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Координаты передающей антенны для РК с $f_{нгр} = 3$ ГГц

Положение антенны	x , м	y , м	z , м
1	0,45	0,1	1,0
2	0,40625	0,1625	1,0075
3	0,3625	0,225	1,015
4	0,31875	0,2875	1,0225
5	0,275	0,35	1,030
6	0,23125	0,4125	1,0375
7	0,1875	0,475	1,045
8	0,14375	0,5375	1,0525
9	0,1	0,6	1,06

На основе вычисленных частотных зависимостей напряженностей E -поля в местах расположения мониторов поля выполнен расчет x , y и z -компонент среднеквадратического отклонения согласно (1.27)–(1.32). Видно, что максимальное отклонение полученных значений σ составляет 1,5 дБ от предельного уровня 3 дБ только на ряде частот (рисунок 4.10).

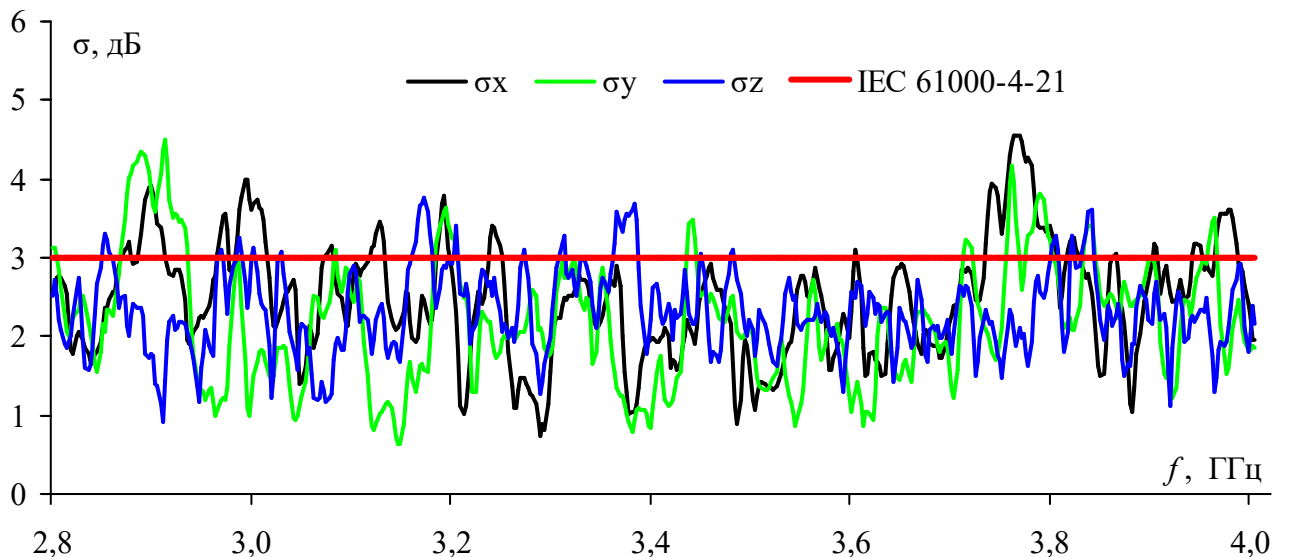


Рисунок 4.10 – Частотные зависимости среднеквадратического отклонения вычисленных значений прямоугольных компонент E -поля в РК с $f_{нгр} = 3$ ГГц

4.3 Сравнение с результатами электродинамического анализа

Для оценки достоверности результатов, полученных с помощью разработанной аналитической модели, выполнен электродинамический анализ распределения ЭМП в РК с $f_{нгр} = 3$ ГГц. Для формирования ЭМП внутри корпуса РК разработана модель диконической антенны, расчет геометрических параметров которой выполнен согласно аналитическим выражениям, представленным в работах [159–161], исходя из требований к центральной рабочей частоте $f_{ц} = 5$ ГГц с коэффициентом перекрытия диапазона частот $K_{\delta} = 3$. Размеры антенны составили: $D_{c1} = 42,57$ мм, $D_{c2} = 0,53$ мм, $D_d = 29,8$ мм, $H = 42,57$ мм, $R = 0,1$ мм, $S = 0,16$ мм, $\theta_h = 29,6^\circ$ (рисунок 4.11).

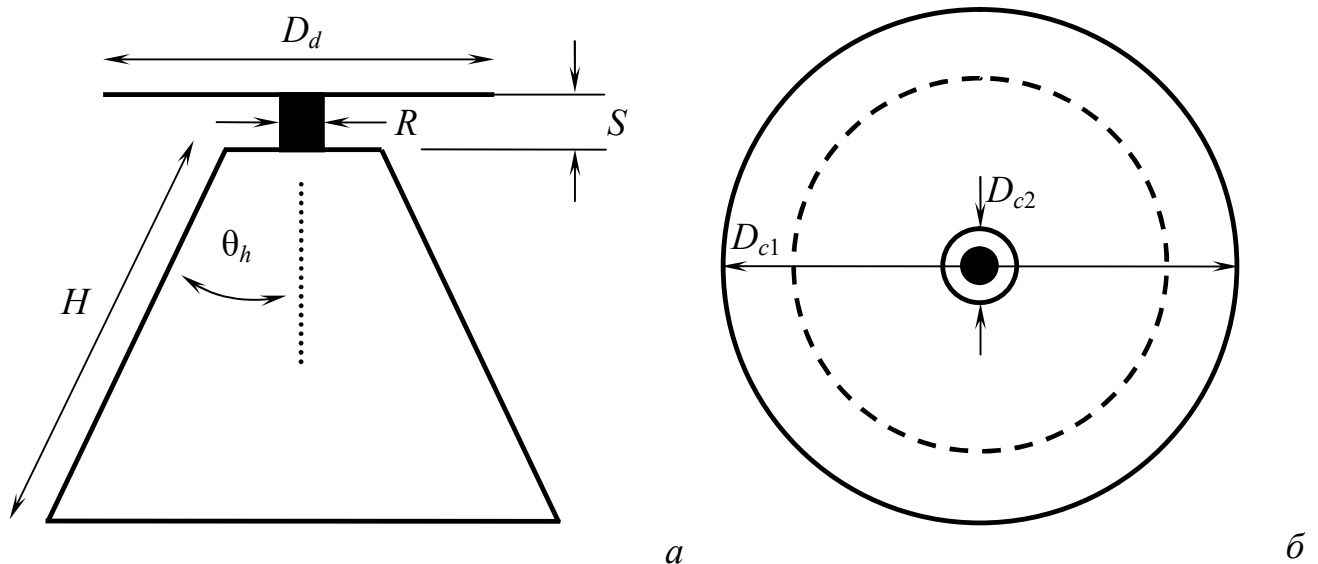


Рисунок 4.11 – Геометрические параметры диконической антенны:
вид сбоку (а), вид спереди на конус (б)

На рисунке 4.12 приведена частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ антенны, из которой видно, что значения $|S_{11}|$ не превышают уровня минус 16 дБ на частотах до 2,5–4,5 ГГц и минус 9 дБ на частотах 4,5–7,5 ГГц соответственно, что говорит о согласовании антенны с фидерным трактом 50 Ом в диапазоне рабочих частот РК.

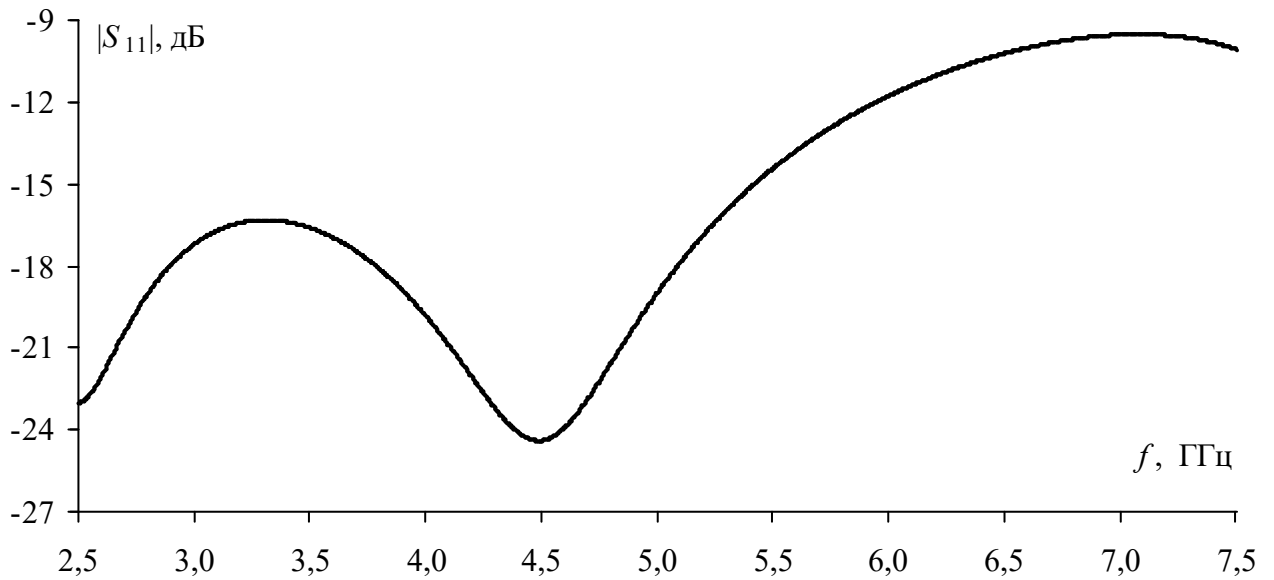


Рисунок 4.12 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ модели антенны

Разработана модель РК, включающая экранированный корпус с внутренним объемом $0,55 \times 0,74 \times 1,2 \text{ м}^3$, толщиной стен 5 мм, а также модель рассчитанной антенны, как показано на рисунке 4.13. Вычисление напряженности E -поля выполнено при аналогичном размещении мониторов E -поля, как указано в таблице 4.3, в 501 частотной точке в диапазоне частот 2,8-4 ГГц с помощью МКРВО (рисунок 4.13 б). Изменение граничных условий распространения ЭМВ выполнено посредством перемещения фазового центра антенны согласно координатам из таблицы 4.4.

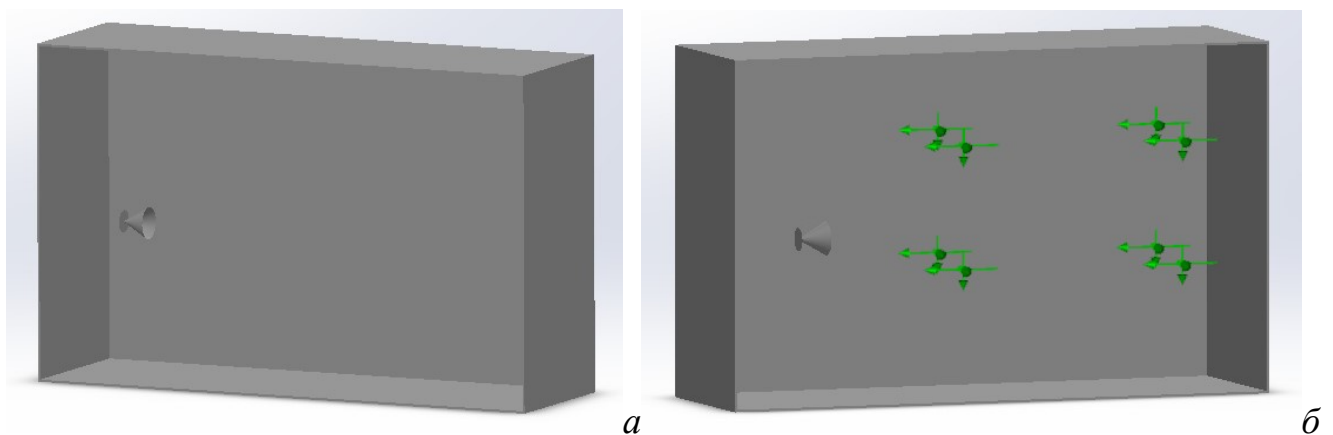


Рисунок 4.13 – Общий вид электродинамической модели РК с антенной (а) и мониторами E -поля (б)

Для уменьшения временных затрат на моделирование вместо материалов с потерями в качестве материала корпуса и антенны выбран идеальный проводник, а потери при распространении ЭМВ внутри РК учтены посредством изменения проводимости среды (воздуха) до значения 10^{-5} См/м, как указано в работах [162-165].

На рисунке 4.14 приведена вычисленная частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ антенны в экранированном корпусе, из которой наблюдается влияние собственных типов волн РК на параметры рассеяния, что выражается в увеличении значений $|S_{11}|$ вплоть до 0 дБ на ряде частот и осциллирующем характере частотной зависимости.

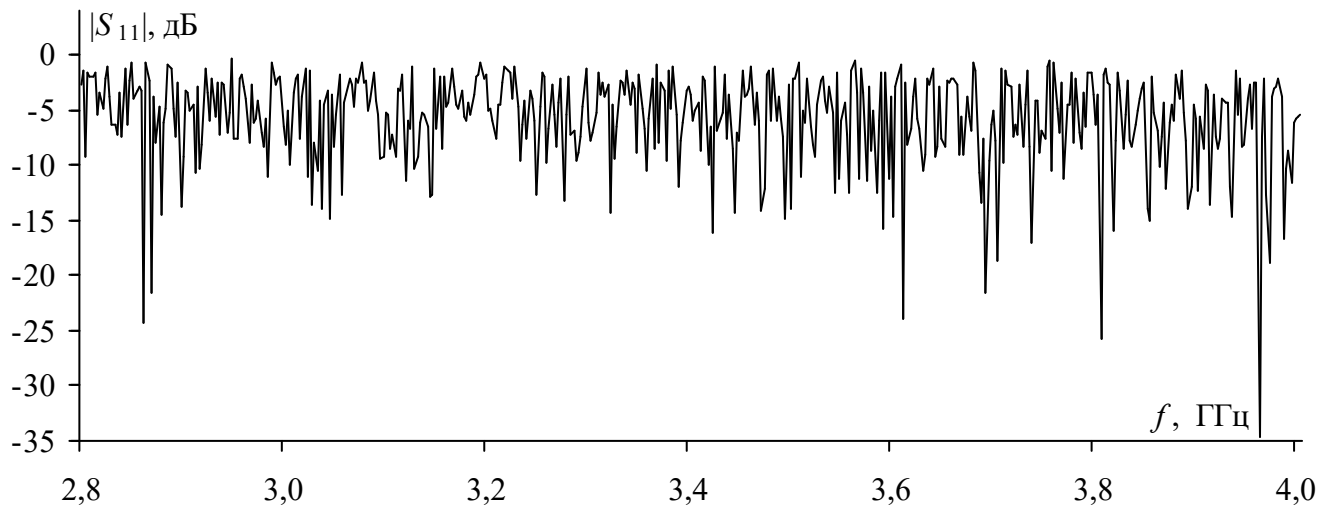


Рисунок 4.14 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ антенны, размещенной внутри корпуса РК

На рисунке 4.15 приведены вычисленные частотные зависимости модулей компонент напряженности E -поля для первого монитора поля (таблица 4.3) и первого положения антенны (таблица 4.4). Из приведенных зависимостей наблюдается резонансный характер значений компонент $|E|$ в виде резкого уровня зависимости на ряде частот, вплоть до 1 кВ/м.

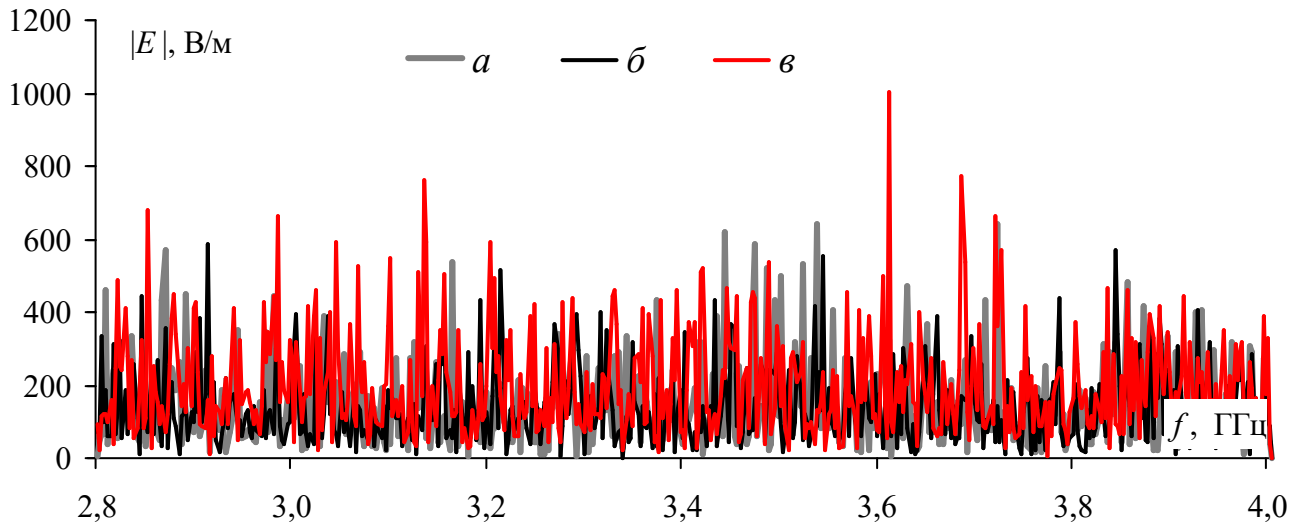


Рисунок 4.15 – Вычисленные частотные зависимости $|E_x|$ (а), $|E_y|$ (б) и $|E_z|$ (в) для монитора 1

На рисунке 4.16 приведены частотные зависимости модуля x -компонент напряженностей E -поля, вычисленные при 9 положениях антенны. Видно изменение амплитуд и частот пиков на зависимости $|E_x|$, связанное с изменением частот резонансов собственных типов волн РК.

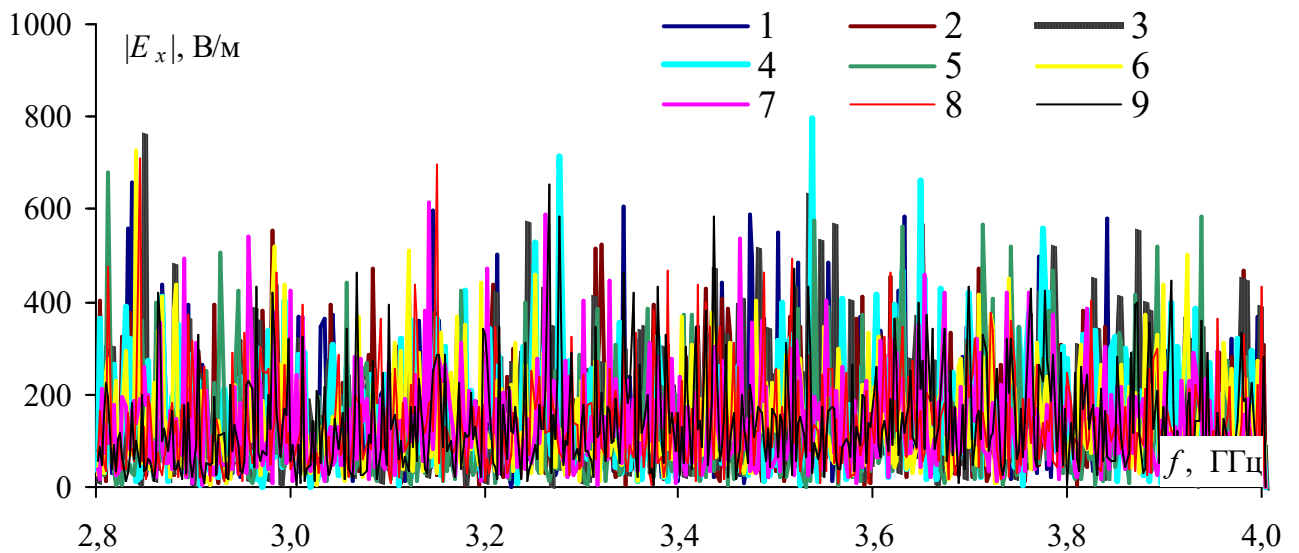


Рисунок 4.16 – Вычисленные частотные зависимости $|E_x|$ при положениях антенны 1-9

На основе вычисленных значений x -, y - и z -компонент $|E|$ в местах расположения мониторов поля при 9 положениях антенны выполнен расчет

среднеквадратического отклонения согласно (1.28)–(1.32). Сравнение вычисленных зависимостей с результатами, полученными с помощью аналитической модели, приведены на рисунках 4.17, 4.18 и 4.19 соответственно.

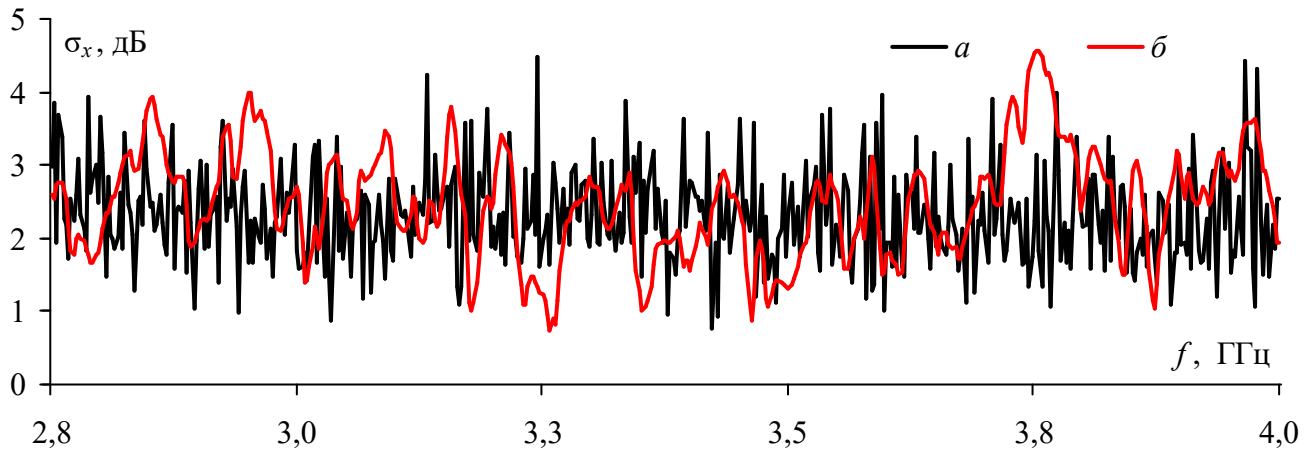


Рисунок 4.17 – Сравнение вычисленных частотных зависимостей σ_x , полученных с помощью МКРВО (a) и разработанной аналитической модели (b)

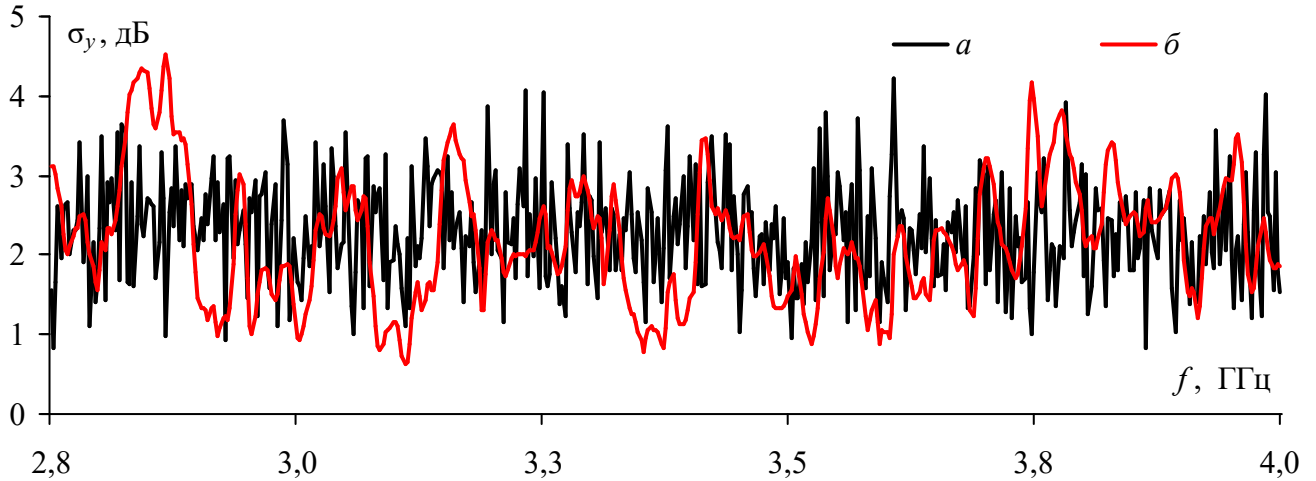


Рисунок 4.18 – Сравнение вычисленных частотных зависимостей σ_y , полученных с помощью МКРВО (a) и разработанной аналитической модели (b)

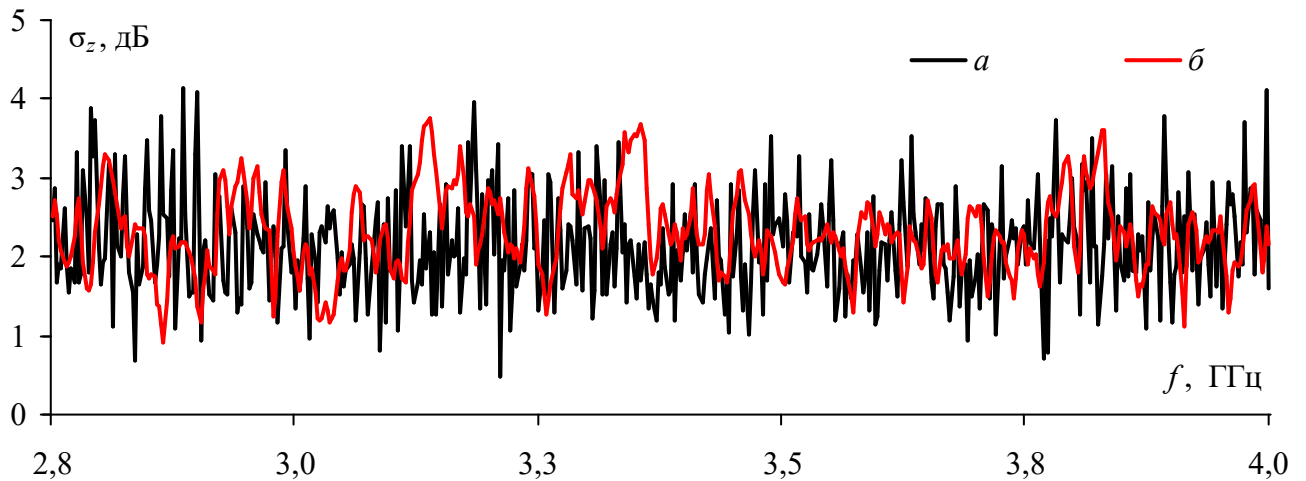


Рисунок 4.19 – Сравнение вычисленных частотных зависимостей σ_z , полученных с помощью МКРВО (a) и разработанной аналитической модели (b)

Из полученных зависимостей видно, что максимальные расхождения результатов составляют 2,75 дБ на частоте 3,78 ГГц (рисунок 4.17), 1,94 дБ на частоте 2,89 ГГц (рисунок 4.18) и 1,72 дБ на частоте 3,38 ГГц (рисунок 4.19). При этом зависимости сопоставимы по амплитуде, а среднее значение расхождения результатов в рассматриваемом диапазоне частот составило 0,78 дБ для трех компонент напряженности E -поля. Временные затраты на анализ модели РК с помощью МКРВО составили 372 часа и 11 минут, а с помощью аналитической модели – 3 минуты, 39 секунд, что в 5851 раза быстрее процедуры электродинамического анализа. Таким образом, разработанная модель может быть использована на предварительной стадии проектирования РК для анализа основных показателей и приближенной оценки среднеквадратического отклонения напряженности E -поля в рабочей зоне.

4.4 Основные результаты раздела

Представлены результаты разработки математической модели РК, предназначенной для приближенной оценки распределения электрического поля в рабочей зоне камеры, в зависимости от геометрических параметров корпуса, а также нижней и верхней граничных частот РК. Обобщены математические выражения для вычисления напряженности E -поля в точке наблюдения,

основанные на представлении ЭМП в РК в виде суперпозиции возбуждаемых внутри корпуса РК собственных резонансных типов волн. С помощью разработанной модели выполнен анализ и сравнение с требованиями стандарта IEC 61000-4-21 частотных зависимостей среднеквадратического отклонения напряженности E -поля для двух конструкций РК, предназначенных для испытаний крупногабаритной и малогабаритной РЭС. Сравнение результатов, полученных с помощью аналитической модели и МКРВО, выявило их удовлетворительную сходимость, что говорит о возможности использования разработанной модели для быстрых приближенных оценок распределения поля внутри РК с прямоугольным корпусом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

При выполнении диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Разработана и создана ТЕМ-камера для исследований и испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС с высотой профиля не более 5 мм с максимальным значением модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ минус 17 дБ в диапазоне рабочих частот до 5,3 ГГц. Приведены результаты оценки в разработанной камере помехоэмиссии в диапазоне частот 50 кГц–5,2 ГГц от отечественного микроконтроллера на базе ядра ARM Cortex-M3.

2. 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 вычислению 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.

3. 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 компонент напряженности E -поля согласно требованиям стандарта ECSS, полученных с помощью разработанной программной реализации модели и МКРВО, выявлена удовлетворительная сходимость 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.

Таким образом, поставленные задачи выполнены, а цель работы достигнута. В работе решена задача усовершенствования устройств для испытаний на ЭМС в расширенном диапазоне амплитуд и частот воздействий, что соответствует

п. 2 и 9 областей исследований паспорта специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии:

– исследование характеристик антенн и СВЧ-устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.

– разработка методов проектирования и оптимизации антенных систем и СВЧ-устройств широкого применения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЕМ	Transverse Electromagnetic Mode
ИО	Испытуемый объект
ИС	Интегральная схема
КСВН	Коэффициент стоячих волн по напряжению
МКРВО	Метод конечных разностей во временной области
МКЭ	Метод конечных элементов
ММЛП	Метод матрицы линии передачи
МЭК	Международный электротехнический комитет
ПП	Печатная плата
РК	Реверберационная камера
РЭС	Радиоэлектронное средство
ЭКБ	Электронная компонентная база
ЭМВ	Электромагнитная волна
ЭМП	Электромагнитное поле
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭЭ	Эффективность экранирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демаков А.В. Обзор коаксиальных камер для измерения эффективности экранирования композитных материалов // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 272–275.
2. Демаков А.В. Обзор экранирующих материалов / А.В. Демаков, М.А. Зуева // Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018. – С. 315–318.
3. Демаков А.В. Обзор методов измерения эффективности экранирования композитных материалов при помощи ТЕМ-камер // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–13 апреля, 2018. – С. 86–89.
4. 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>.
5. Theis T.N. The end of Moore's law: a new beginning for information technology / T.N. Theis, H.-S. P. Wong // Computing in science & engineering. – 2017. – Vol. 19, no 2. – P. 41-50.
6. Fiori F.L. Investigations on the susceptibility of smart power ICs to RFI // International symposium on electromagnetic compatibility. – 2013. – P. 743-747.
7. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов. // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». – 2013. – № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.html#6>.

8. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.
9. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты: монография / Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов – М.: ООО «Группа ИДТ», 2008. – 478 с.
10. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / под ред. В.Н. Лепина. – М.: Радиотехника, 2017. – 416 с.
11. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
12. Busygina A.V. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects / A.V. Busygina, M.E. Komnatnov, O.A. Matveyenko // Сибирский научный медицинский журнал. – 2016. – Т. 36. – № 1. – С. 48–64.
13. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов, И.П. Кужекин, А.Г. Темников, А.В. Жуков; под ред. чл.-корр. РАН, докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 543 с.
14. Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 302 с.
15. Ключник А.В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники» . – 2010. – № 8. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug10/3/text.html>
16. IEC 62132-4–2006. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz – Part 4: Direct RF power injection method.

17. IEC 61967-2–2005. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 2: Measurement of radiated emissions, TEM cell and wideband TEM cell method.
18. IEC 62132-2–2010. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity – Part 2: Measurement of radiated immunity, TEM cell and wideband TEM cell method.
19. Bohr M.T. CMOS scaling trends and beyond / M.T. Bohr, I.A. Young // IEEE Micro. – 2017. – Vol. 37, no. 6. – P. 20–29.
20. Mohajer-Iravani B. Reactive power radiated from the planar electromagnetic bandgap structures a source of EMI in high speed packages / B. Mohajer-Iravani, O.M. Ramahi // Proceedings of the IEEE International symposium on antennas and propagation. –2011. – P. 1840-1843.
21. Semiconductor Packaging Search | Texas Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ti.com/packaging/docs/searchtipackages.tsp?packageName=BGA>, свободный (дата обращения 25.06.2019).
22. Корпуса производимые компанией АО "ПКК Миландр" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.milandr.ru/packages>, свободный (дата обращения 25.06.2019).
23. Piersanti S. Near field shielding performances of absorbing materials for integrated circuits (IC) applications, part I: lateral excitation / S. Piersanti, A. Orlandi, F. Paulis, S. Connor, M.A. Khorrami, P. Dixon, B. Archambeault, J.L. Drewniak // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 60, no. 1. – P. 188–195.
24. Пат. 7532473 США, МПК H05K9/0088. Composite EMI shield / Jeff McFadden (US), Martin Rapp (US). – № 10/461930; заявл. 13.06.2003; выдан 5.02.2004.
25. ASTM ES7–1983. Test method for electromagnetic shielding effectiveness of planar materials.

26. ASTM D4935–2018. Standard test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials.
27. Ó hAinmídh B. Devices and Sensors Applicable to 5G System Implementations / B. Ó hAinmídh, P. Fitzgerald, H. Berney, R. Lakshmanan, N. Coburn, S. Geary, B. Mulvey // IEEE MTT-S International microwave workshop series on 5G hardware and system technologies. – 2018. – P. 1-1.
28. Varum T. Planar microstrip series-fed array for 5G applications with beamforming capabilities / T. Varum, A. Ramos, J.N. Matos // IEEE MTT-S International microwave workshop series on 5G hardware and system technologies. – 2018. – P. 1-1.
29. Osseiran A. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project / A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, et al // IEEE Communications magazine. – 2014. – Vol. 52, no 5. – P. 26-35.
30. IEC 61000-4-21–2011. Electromagnetic compatibility (EMC)– Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods.
31. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1974. – Vol. 16, no. 4. – P. 189–195.
32. Karst J.P. Calculable field generation using TEM cells applied to the calibration of a novel E-field probe / J.P. Karst, C. Groh, H. Garbe // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility – 2002. – Vol. 44, no. 1. – P. 59–71.
33. Kohler S. Experimental microdosimetry techniques for biological cells exposed to nanosecond pulsed electric fields using microfluorimetry / S. Kohler, R.P. O’Connor, T.D.T. Vu, P. Leveque, D. Arnaud-Cormos // IEEE Transactions on microwave theory and techniques – 2013. – Vol. 61, no. 5. – P. 2015–2022.
34. Malaric K. Design of a TEM-cell with increased usable test area / K. Malaric, J. Bartolic // Turkish journal of electrical engineering & computer sciences. – 2003. – Vol. 11, no. 2. – P. 143–154.

35. Weil C.M. The characteristic impedance of rectangular transmission lines with thin center conductor and air dielectric // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1978. – Vol. 26, no. 4. – P. 238–242.
36. Crawford M.L. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements / M.L. Crawford, J.L. Workman, C.G. Thomas // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1978. – Vol. 20, no. 3. – P. 368–375.
37. Рахаева Е.А. Методы расчета и анализ характеристик электромагнитных полей в ТЕМ-камерах: Дисс кан. физ.-мат. наук: 01.04.01. Самара, 2008 – 128 с.
38. Hese J.V. Simulation of the effect of inhomogeneities in TEM transmission cells using the FDTD-method / J.V. Hese, L. Martens, D.D. Zutter, C. Wagter, L. Malmgren, B. Persson, L. Salford // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1992. – Vol. 34, no. 3. – P. 292–297.
39. 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 Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49, no. 3. – P. 474-484.
40. Paffi A. TEM cell system for vivo exposure at 2.45 GHz / A. Paffi, M. Liberti, F. Fratta, C. Merla, R. Pinto, G.A. Lovisolo // European conference on antennas and propagation (EUCAP). –2012. – P. 1099–1101.
41. Deng S. Mode suppressed TEM cell design for high frequency IC measurements / S. Deng, D. Pommerenke, T. Hubing, J. Drewniak, D. Beetner, D. Shin, S. Kim, H. Kwak // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – 2007. – P. 1–6.
42. Mullerwiebus V. Error of emission measurement of ICs due to imperfect termination of TEM Cell / V. Mullerwiebus, B. Deutschmann, F. Klotz // International symposium on electromagnetic compatibility. – 2008. – P. 1–5.

43. 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 International symposium on electromagnetic compatibility. – 2012. – P. 1–6.
44. Mandic T. Optimization of IC-stripline performance by response surface space-mapping technique / T. Mandic, R. Gillon, A. Baric // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no 4. – P. 1232-1238.
45. Cai X.-D. Analysis of asymmetric TEM cell and its optimum design of electric field distribution / X.-D. Cai, J.-Y. Li // IEE Proceedings H – Microwaves, Antennas and Propagation. – 1989. – Vol. 136, no. 3. – P. 191–194.
46. Peng Z. Analysis of the field distribution in ATEM cell using the three dimensional FDTD-method / Z. Peng, Z. Xiaoping, W. Rong // International conference on computational electromagnetics and its applications. – 1999. – P. 270-273.
47. Demakov A.V. Command console of environmental shielded TEM-chamber / A.V. Demakov, A.V. Osintsev, M.E. Komnatnov // International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 403–405.
48. IEEE Std-299–2007. IEEE Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures.
49. Tamburrano A. Coaxial waveguide methods for shielding effectiveness measurement of planar materials up to 18 GHz / A. Tamburrano, D. Desideri, A. Maschio, M.S. Sarto // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility – 2014. – Vol. 56, no. 6. – P. 1386-1395.
50. Sarto M.S. A. Innovative test method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range / M.S. Sarto, A. Tamburrano // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48, no. 2. – P. 331–341.

51. Sarto M.S. Experimental characterization and modeling of metallized textiles for electromagnetic shielding / M.S. Sarto, S. Greco, A. Tamburrano // International symposium on electromagnetic compatibility. – 2013. – P. 1–4.
52. Bozzetti M. Shielding performance of an expanded copper foil over a wide frequency range / M. Bozzetti, L. Pisu, M.S. Sarto, S. Greco // International symposium on electromagnetic compatibility. – 2011. – P. 46–51.
53. Wilson P.F. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: Part I—far-field source simulation // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1998. – Vol. 30, no. 3. – P. 239–250.
54. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
55. Valente R. Setup for EMI shielding effectiveness tests of electrically conductive polymer composites at frequencies up to 3.0 GHz / R. Valente, C.D. Ruijter, D. Vlasveld, S.V.D. Zwaag, P. Groen // IEEE Access – 2017. – Vol. 5. – P. 16665-16675.
56. MIL-STD-1377 – 1971. Department of defense test method standard: effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance (HERO), measurement of (20 Aug 1971).
57. Serra R. Reverberation chambers a la carte: an overview of the different mode-stirring techniques / R. Serra, A.C. Marvin, F. Moglie, V.M. Primiani, A. Cozza, L.R. Arnaut, Y. Huang, M.O. Hatfield, M. Klingler, F. Leferink // IEEE Electromagnetic compatibility magazine. – 2017. – Vol. 6, no. 1. – P. 63–78.
58. Liu B. H., Chang D. C., Ma M. T. Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber, NBS Technical Note 1066. – National Bureau of Standards, 1983. 62 p.
59. Hill D.A. Boundary fields in reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2005. – Vol. 47, no. 2. – P. 281–290.

60. Дмитриева Н.Ю. Теоретическое исследование особенностей применения метода испытаний технических средств на помехоустойчивость с использованием реверберационных камер / Н.Ю. Дмитриева, Д.И. Крохалев // Технологии ЭМС. – 2016. – № 3(58). – С. 38–50.
61. IEC 1000-4-3–1995. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Testing and measurement techniques, Section 3: Radiated radio-frequency electromagnetic field immunity test (revision of IEC 801-3).
62. Clegg J. Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber / J. Clegg, A.C. Marvin, J.F. Dawson, S.J. Porter // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2005. – Vol. 47, no. 4. – P. 824-832.
63. Arnaut L.R. Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2002. – Vol. 44, no. 3. – P. 452–457.
64. Fedeli D. Experimental and numerical analysis of a carousel stirrer for reverberation chambers / D. Fedeli, M. Iuale, V.M. Primiani, F. Moglie // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Edinburgh, 2012. – P. 228–233.
65. Jensen P.T. Practical industrial EUT testing in reverb chamber experiences, findings and practical observations on high amplitude immunity testing of industrial equipment in reverberation chamber / P.T. Jensen, A.P. Munster, R.B. Behnke // International symposium on electromagnetic compatibility. – Gothenburg, 2014. – P. 274-279.
66. Selemani K. Energy localization effects within a reverberation chamber and their reduction in chaotic geometries / K. Selemani, E. Richalot, O. Legrand, O. Picon, F. Mortessagne // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 2. – P. 325–333.
67. Arnaut L.R. Helical stirring for enhanced low-frequency performance of reverberation chambers / L.R. Arnaut, F. Moglie, L. Bastianelli, V.M. Primiani //

- IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 4. – P. 1016–1026.
68. Karandikar Y.B. Mode counting in rectangular, cylindrical, and spherical cavities with application to wireless measurements in reverberation chambers / Y.B. Karandikar, D. Nyberg, N. Jamaly, P.S. Kildal // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2009. – Vol. 51, no. 4. – P. 1044–1046.
 69. Arnaut L.R. Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary / L.R. Arnaut, P.D. West // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48, no. 2. – P. 359–371.
 70. Arnaut L.R. Statistical anisotropy in imperfect electromagnetic reverberation / L.R. Arnaut, R. Serra, P.D. West // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 1. – P. 3-13.
 71. Kouveliotis N.K. Theoretical investigation of the field conditions in a vibrating reverberation chamber with an unstirred component / N.K. Kouveliotis, P.T. Trakadas, C.N. Capsalis // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2003. – Vol. 45, no. 1. – P. 77-81.
 72. Serra R. «Good-but-imperfect» electromagnetic reverberation in a VIRC / R. Serra, F. Leferink, F. Canavero // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – USA, 2011. – P. 954–959.
 73. Vallon H. Time-reversed excitation of reverberation chambers: improving efficiency and reliability in the generation of radiated stress / H. Vallon, A. Cozza, F. Monsef, A.S. Chauchat // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 2. – P. 364–370.
 74. Arnaut L.R. Maximum rate of frequency scanning for distortionless signal generation in electromagnetic reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2008. – Vol. 50, no. 4. – P. 787–793.
 75. Hatfield M.O. Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1988. – Vol. 30, no. 3. – P. 229–238.

76. Arnaut L.R. Pulse jitter, delay spread, and Doppler shift in mode-stirred reverberation // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 6. – P. 1717–1727.
77. Hill D.A. Electronic mode stirring for reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1994. – Vol. 36, no. 4. – P. 294-299.
78. Cozza A. Controlling the state of a reverberation chamber by means of a random multiple-antenna stirring / A. Cozza, W. J. Koh, Y.S. Ng, Y.Y. Tan // Asia-pacific symposium on electromagnetic compatibility. – Singapore, 2012. – P. 765–768.
79. Leo A.D. Low-frequency theoretical analysis of a source-stirred reverberation chamber / A.D. Leo, V.M. Primiani, P. Russo, G. Cerri // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 2. – P. 315–324.
80. Voges E. Electrical mode stirring in reverberating chambers by reactively loaded antennas / E. Voges, T. Eisenburger // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49, no. 4. – P. 756–761.
81. Huang Y. A novel reverberating chamber: the source-stirred chamber / Y. Huang, D.J. Edwards // International conference on electromagnetic compatibility. – UK, 1992. – P. 120-124.
82. Cerri G. Source stirring mode for reverberation chambers / G. Cerri, V.M. Primiani, S. Pennesi, P. Russo // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2005. – Vol. 47, no. 4. – P. 815–823.
83. Cerri G. A theoretical feasibility study of a source stirring reverberation chamber / G. Cerri, V.M. Primiani, C. Monteverde, P. Russo // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2009. – Vol. 51, no. 1. – P. 3–11.
84. Monteverde C. Source stirring technique for reverberation chambers; experimental investigation / C. Monteverde, G.H. Koepke, C.L. Holloway, J.M. Ladbury, D.A. Hill, V.M. Primiani, P. Russo // International symposium on electromagnetic compatibility. – Germany, 2008. – P. 1–6.

85. Amador E. Source stirring analysis in a reverberation chamber based on modal expansion of the electric field / E. Amador, P. Besnier // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Germany, 2015. – P. 434–439.
86. Kunthong J. Source-stirring and mechanical-stirring reverberation chamber measurement comparison for 900 MHz and 1800 MHz / J. Kunthong, C.F. Bunting // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – USA, 2009. – P. 193–196.
87. Serra R. Reverberation chambers through the magnifying glass: an overview and classification of performance indicators // IEEE Electromagnetic compatibility magazine. – 2017. – Vol. 6, no. 2. – P. 76–88.
88. Arnaut L.R. Validating reverberation chamber performance based on assessment of field anisotropy / L.R. Arnaut, R. Serra, P. West // International symposium on electromagnetic compatibility. – Poland, 2016. – P. 205–210.
89. Space engineering. Electromagnetic compatibility handbook. – ESA Requirements and Standards Division, ESTEC, 2012. – 228 p.
90. Kostas J.G. Statistical model for a mode-stirred chamber / J.G. Kostas, B. Boverie // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1991. – Vol. 33, no. 4. – P. 366–370.
91. Arnaut L.R. Statistics of the quality factor of a rectangular reverberation chamber // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2003. – Vol. 45, no. 1. – P. 61–76.
92. Serra R. Wave impedance in reverberation chambers / R. Serra, J. Nijenhuis // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2014. – Vol. 56, no. 1. – P. 231–234.
93. Lemoine C. Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber / C. Lemoine, P. Besnier, M. Drissi // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2008. – Vol. 50, no. 2. – P. 227–236.

94. Ferrara G. Characterization of GSM non-line-of-sight propagation channels generated in a reverberating chamber by using bit error rates / G.Ferrara, M. Migliaccio, A. Sorrentino // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49, no. 3. – P. 467–473.
95. Remley K.A. Static and dynamic propagation-channel impairments in reverberation chambers / K.A. Remley, S.J. Floris, H.A. Shah // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2011. – Vol. 53, no. 3. – P. 589-599.
96. Tait G.B. Ambient power density and electric field from broadband wireless emissions in a reverberant space / G.B. Tait, C.E. Hager, T.T. Baseler, M.B. Slocum // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 1. – P. 307–313.
97. West J.C. Accurate and efficient numerical simulation of the random environment within an ideal reverberation chamber / J.C. West, C.F. Bunting, V. Rajamani // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2012. – Vol. 54, no. 1. – P. 167-173.
98. Hill D.A. Spatial-correlation functions of fields and energy density in a reverberation chamber / D.A. Hill, J.M. Ladbury // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2002. – Vol. 44, no. 1. – P. 95–101.
99. Magdowski M. Coupling of stochastic electromagnetic fields to a transmission line in a reverberation chamber / M. Magdowski, S.V. Tkachenko, R. Vick // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2011. – Vol. 53, no. 1. – P. 308–317.
100. Coates A. Validation of a three-dimensional transmission line matrix (TLM) model implementation of a mode-stirred reverberation chamber / A. Coates, H.G. Sasse, D.E. Coleby, A.P. Duffy, A. Orlandi // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49, no. 4. – P. 734–744.

101. Orjubin G. On the FEM modal approach for a reverberation chamber analysis / G. Orjubin, E. Richalot, S. Mengue, M.-F. Wong, O. Picon // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49, no. 1. – P. 76–85.
102. Amador E. Reverberation chamber modeling based on image theory: investigation in the pulse regime / E. Amador, C. Lemoine, P. Besnier, A. Laisne // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2010. – Vol. 52, no. 4. – P. 778–789.
103. Cozza A. The role of losses in the definition of the overmoded condition for reverberation chambers and their statistics // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2011. – Vol. 53, no. 1. – P. 296–307.
104. Mengue S. Comparison between different criteria for evaluating reverberation chamber functioning using a 3-D FDTD algorithm / S. Mengue, E. Richalot, O. Picon // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2008. – Vol. 50, no. 2. – P. 237–245.
105. Pirkl R.J. Reverberation chamber measurement correlation / R.J. Pirkl, K.A. Remley, C.S. Patane // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2012. – Vol. 54, no. 3. – P. 533–545.
106. Hill D.A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1998. – Vol. 40, no. 3. – P. 209–217.
107. Gifuni A. Deterministic approach to estimate the upper bound of the electric field in a reverberation chamber // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2011. – Vol. 53, no. 3. – P. 570–578.
108. Huikan L. Spatial correlation functions of fields in a reverberation chamber based on expansion of spherical Bessel functions // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48, no. 2. – P. 427–428.
109. Hill D.A. Uniqueness of plane wave integral representation for idealized fields in reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2015. – Vol. 57, no. 3. – P. 584–586.

110. Hoijer M. Maximum power available to stress onto the critical component in the equipment under test when performing a radiated susceptibility test in the reverberation chamber // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48, no. 2. – P. 372–384.
111. Junqua I. On the power dissipated by an antenna in transmit mode or in receive mode in a reverberation chamber / I. Junqua, P. Degauque, M. Liénard, F. Issac // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2012. – Vol. 54, no. 1. – P. 174–180.
112. Hu D. Investigation of the radiation immunity testing method in reverberation chambers / D. Hu, G. Wei, X. Pan, K. Ji // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 6. – P. 1791–1797.
113. Hill D.A. Reciprocity in reverberation chamber measurements // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2003. – Vol. 45, no. 1. – P. 117-119.
114. Hill D.A. Radiated emissions and immunity of microstrip transmission lines: theory and reverberation chamber measurements / D.A. Hill, D.G. Camell, K.H. Cavcey, G.H. Koepke // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1996. – Vol. 38, no. 2. – P. 165–172.
115. Krauthauser H.G. On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49, no. 2. – P. 270–279.
116. Holloway C.L. Shielding effectiveness measurements of materials using nested reverberation chambers / C.L. Holloway, D.A. Hill, J. Ladbury, G. Koepke, R. Garzia // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2003. – Vol. 45, no. 2. – P. 350-356.
117. Tian Z. Efficient methods of measuring shielding effectiveness of electrically large enclosures using nested reverberation chambers with only two antennas / Z. Tian, Y. Huang, Q. Xu // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 6. – P. 1872–1879.

118. Fedeli D. Accurate analysis of reverberation field penetration into an equipment-level enclosure / D. Fedeli, G. Gradoni, V.M. Primiani, F. Moglie // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2009. – Vol. 51, no. 2. – P. 170-180.
119. Wang Q. On the shielding effectiveness of small-dimension enclosures using a reverberation chamber / Q. Wang, E. Cheng, Z. Qu // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2011. – Vol. 53, no. 3. – P. 562–569.
120. Holloway C.L. Use of reverberation chambers to determine the shielding effectiveness of physically small, electrically large enclosures and cavities / C.L. Holloway, D.A. Hill, M. Sandroni, J.M. Ladbury, J. Coder, G. Koepke, A.C. Marvin, Y. He // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2008. – Vol. 50, no. 4. – P. 770–782.
121. Tait G.B. On measuring shielding effectiveness of sparsely moded enclosures in a reverberation chamber / G.B. Tait, C. Hager, M.B. Slocum, M.O. Hatfield // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2013. – Vol. 55, no. 2. – P. 231-240.
122. Höijer M. Field statistics in nested reverberation chambers / M. Höijer, L. Kroon // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2013. – Vol. 55, no. 6. – P. 1328-1330.
123. Loughry T.A. The effects of intrinsic test fixture isolation on material shielding effectiveness measurements using nested mode-stirred chambers / T.A. Loughry, S.H. Gurbaxani // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1995. – Vol. 37, no. 3. – P. 449–452.
124. Primiani V.M. Modeling of the reverberation chamber method for determining the shielding properties of a coaxial cable / V.M. Primiani, F. Moglie, A.P. Pastore // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2008. – Vol. 50, no. 2. – P. 246–251.
125. Xu Q. Average absorption coefficient measurement of arbitrarily shaped electrically large objects in a reverberation chamber / Q. Xu, Y. Huang, L. Xing,

- Z. Tian, J. Zhou, A. Chen, Y. Zhuang // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 6. – P. 1776–1779.
126. Carlberg U. Calculated and measured absorption cross sections of lossy objects in reverberation chamber / U. Carlberg, P.-S. Kildal, A. Wolfgang, O. Sotoudeh, C. Orlienius // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, no. 2. – P. 146-154.
127. Capstick M.H. A radio frequency radiation exposure system for rodents based on reverberation chambers / M.H. Capstick, S. Kuehn, V. Berdinas-Torres, Y. Gong, P.F. Wilson, J.M. Ladbury, G. Koepke // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 4. – P. 1041–1052.
128. Senic D. Whole-body specific absorption rate assessment of lossy objects exposed to a diffuse field inside a reverberant environment / D. Senic, A. Sarolic, C.L. Holloway, J.M. Ladbury // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 3. – P. 813–822.
129. Tsigros C. Radiated immunity in reverberation and semianechoic rooms: conditions for equivalence / C. Tsigros, M. Piette, G.A.E. Vandenbosch, D.V. Troyen // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2013. – Vol. 55, no. 2. – P. 222–230.
130. Fall A.K. Experimental dosimetry in a mode-stirred reverberation chamber in the 60-GHz band / A.K. Fall, P. Besnier, C. Lemoine, M. Zhadobov, R. Sauleau // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 4. – P. 981–992.
131. Chakarothai J. A hybrid MoM/FDTD method for dosimetry of small animal in reverberation chamber / J. Chakarothai, J. Wang, O. Fujiwara, K. Wake, S. Watanabe // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2014. – Vol. 56, no. 3. – P. 549-558.
132. Chakarothai J. Numerical techniques for SAR assessment of small animals in reverberation chamber / J. Chakarothai, J. Shi, J. Wang, O. Fujiwara, L. Wake,

- S. Watanabe // IEEE Electromagnetic compatibility magazine. – 2015. – Vol. 4, no. 1. – P. 57–66.
133. 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.
134. 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., Газизов Русл.Р., Салов В.К., Лежнин Е.В., Орлов П.Е., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Ахунов Р.Р., Газизов Руст.Р., Газизов А.Т., Веселовский А.В., Квасников А.А., Носов А.В., Белоусов А.О., Буичкин Е.Н., Лесков А.Н., Демаков А.В., Лемешко К.А., Собко А.А., Осинцев А.В., Калимулин И.Ф. Заявка №20166619296. Дата поступления 01 сентября 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2016 г.
135. 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., Газизов Русл.Р., Бусыгина А.В., Лежнин Е.В., Орлов П.Е., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Ахунов Р.Р., Газизов Руст.Р., Газизов А.Т., Хажibeков Р.Р., Квасников А.А., Носов А.В., Белоусов А.О., Тернов С.А., Сагиева И.Е., Демаков А.В., Осинцев А.В., Собко А.А. Заявка №2017663209. Дата поступления 13 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.
136. 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.

137. Демаков А.В. Модифицированная ТЕМ-камера для испытания интегральных схем на ЭМС / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2017. – Ч. 3. – С. 53–55.
138. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 399-402.
139. 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.
140. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1974. – Vol. 16, no.4. – P. 189–195.
141. Crawford M.L. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements / M.L. Crawford, J.L. Workman, C.G. Thomas // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility – 1978. – Vol. 20, no. 3. – P. 368–375.
142. Комнатнов М.Е. Оптимизация геометрических параметров ТЕМ-камеры / М.Е. Комнатнов, Т.Т. Газизов // Технологии ЭМС. – 2016. – №4 (59). – С. 7-16.
143. Miao X. An adaptive retrospective trust region method for unconstrained optimization / X. Miao, Z. Liu // International conference on information science and engineering (ICISE). – China, 2010. – P. 1-4.
144. Демаков А.В. Разработка коаксиальной камеры для измерения эффективности экранирования композитных материалов / А.В. Демаков, А.М. Артюшкина // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2019. – С. 222–225.

145. Кулешов Г.Е. Электромагнитные характеристики эластомеров на основе порошков гексаферритов / Г.Е. Кулешов, О.А. Доценко, О.А. Кочеткова, В.И. Суляев // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С. 109–113.
146. Демаков А.В. Аналитическая модель реверберационной камеры // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2018. – Ч. 2. – С. 243–246.
147. 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.
148. Сафронова Е.А. Тестирование программной реализации аналитической модели реверберационной камеры / Е.А Сафронова, А.М. Артюшкина, А.В. Демаков // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2018. – Ч. 2. – С. 235–237.
149. Демаков А.В. Analysis of the complexity of the algorithm for calculating the electromagnetic field distribution in a reverberation chamber // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2019. – Ч. 4. – С. 82-85.
150. 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 // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Russia, 2019. – P. 1-5.
151. Terman F.E. Radio Engineer's Handbook // McGraw-Hill Book Company. – 1943.

152. Hill D.A. Electromagnetic fields in cavities: deterministic and statistical theories. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. – 2009.
153. Amador E. Source stirring analysis in a reverberation chamber based on modal expansion of the electric field / E. Amador, P. Besnier // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Germany, 2015. – P. 434–439.
154. Andrieu G. Analytical model of a mechanically stirred reverberation chamber based on EM field modal expansion / G. Andrieu, A. Soltane, A. Reineix // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – 2016. – P. 217–222.
155. GNU Octave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gnu.org/software/octave/>, свободный (дата обращения: 25.10.2018).
156. Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qt.io/>, свободный (дата обращения: 04.04.2019).
157. Cui Y. Fast calculation of reverberation chamber Q-factor / Y. Cui, G. Wei, S. Wang, L. Du // Electronics Letters – 2012. – Vol. 48, no. 18. – P. 1116–1117.
158. Malaric K. Design and construction of a small reverberation chamber / K. Malaric, K. Kosutic // International journal of electrical and computer engineering systems – 2016. – Vol. 7, no. 2. – P. 47–51.
159. McDonald J.L. On the bandwidth of monocone antennas / J.L. McDonald, D.S. Filipovic // IEEE Transactions on antennas and propagation – 2008. – Vol. 56, no. 4. – P. 1196–1201.
160. Ghosh D. Design of a wide-angle biconical antenna for wideband communications / D. Ghosh, T.K. Sarkar, E.L. Mokole // Progress in electromagnetics research B – 2009. – Vol. 16. – P. 229–245.
161. Tai C.-T., Long S.A. Dipoles and Monopoles, ch. 4 in Antenna Engineering Handbook, 4th ed. USA: McGraw-Hill. – 2007.
162. Carlberg U. Study of antennas in reverberation chamber using method of moments with cavity Green's function calculated by Ewald summation /

- U. Carlberg, P.-S. Kildal, J. Carlsson // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2005. – Vol. 47, no. 4. – P. 805-814.
163. Burns C. A closer look at reverberation chambers– 3-D simulation and experimental verification / C. Bruns, R. Vahldieck // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2005. – Vol. 47, no. 3. – P. 612-626.
164. Bunting C.F. Statistical characterization and the simulation of a reverberation chamber using finite-element techniques // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2002. – Vol. 44, no. 1. – P. 214-221.
165. Primiani V.M. Reverberation chamber performance varying the position of the stirrer rotation axis / V.M. Primiani, F. Moglie // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2014. – Vol. 56, no. 2. – P. 486-489.

ПРИЛОЖЕНИЕ



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



ул. Ленина, д. 52, г. Железнодорожный, ЗАТО Железнодорожный, 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
2019 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Демакова Александра Витальевича

Комиссия в составе:

- начальник отделения проектирования и испытаний РЭА – начальник отделения АО «ИСС» В.Н. Школьный;
- начальник отдела конструирования, технологической подготовки производства печатных плат и систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова;
- начальник группы АО «ИСС», к.ф.-м. н. А.А. Хвалько.

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС», для разработки оптимальной сети высоковольтного электропитания (ОСВЭ) космических аппаратов, при выполнении работ по прикладному научному исследованию «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» по проекту ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0172, шифр RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг., следующих результатов диссертационной работы Демакова А.В., отраженных в соответствующих разделах отчетов по указанному проекту:

1. Результаты анализа современной научно-технической, нормативной и методической литературы (п. 1.2.4 отчета за 2017 г.), а также проработка вариантов, обоснование и выбор устройств для измерений уровня излучаемой помехоэмиссии и уровня восприимчивости

элементов и узлов ОСВЭ к излучаемому воздействию (п. 3.4.1 отчета за 2017 г.).

Разработка моделей, алгоритмов и программного обеспечения для проектирования предложенных технических решений (п. 4.2.2.4 отчета за 2018 г.), разработка прототипа устройства для измерения излучаемых электромагнитных помех от элементов и узлов ОСВЭ (п. 4.2.2.2 отчета за 2018 г.).

Главный конструктор проектирования и испытаний РЭА – начальник отделения АО «ИСС»



В.Н. Школьный

Начальник отдела конструирования, технологической подготовки производства печатных плат и систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры АО «ИСС», к.т.н.



С.Б. Сунцов

Начальник группы АО «ИСС», к.ф.-м. н.



А.А. Хвалько



«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор департамента
 образования ТУСУР

д.т.н., профессор

П.Е. Троян

«15» 09 2019

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы

Демакова Александра Витальевича

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по учебной работе, Бусыгина А.В., заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по научной работе, Куксенко С.П., настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ следующих результатов диссертационной работы:

1. Обзор устройств для испытаний радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость (ЭМС).
2. Разработанные модели устройств для измерения помехоэмиссии и оценки помехоустойчивости.
3. Разработанный лабораторный макет камеры для измерения помехоэмиссии и оценки помехоустойчивости.

Указанные результаты используются при проведении занятий по дисциплинам «Испытания по ЭМС», «Теория ЭМС радиоэлектронных средств и систем» для магистрантов по направлениям подготовки «Радиотехника» (11.04.01) и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (11.04.02).

Заместитель заведующего каф. ТУ
 по учебной работе


 /Бусыгина А.В./

Заместитель заведующего каф. ТУ
 по научной работе


 /Куксенко С.П./

The logo of TUSUR University, featuring a stylized 'T' icon followed by the text 'TUSUR UNIVERSITY' in a blue rectangular box.

СВИДЕТЕЛЬСТВО

Аспирант кафедры ТУ

*Демаков
Александр Витальевич*

за высокие достижения
в научно-исследовательской деятельности
включена в состав научно-педагогического
кадрового резерва ТУСУРа

Ректор ТУСУРа

Проректор по НРИ



[Signature]
А.А. Шелупанов

[Signature]
В.М. Рулевский

19 декабря 2018 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017610414

Quasi-static modelling of GTEM-cells

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

Авторы: *Демаков Александр Витальевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2016619498

Дата поступления 08 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 января 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662520

TALGAT 2016

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

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016619296

Дата поступления 01 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Авторы: Газизов Тальгат Рашитович (RU), Мелкозеров Александр Олегович (RU), Газизов Тимур Тальгатович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Заболоцкий Александр Михайлович (RU), Газизов Руслан Рифатович (RU), Салов Василий Константинович (RU), Лежнин Евгений Владимирович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Суровцев Роман Сергеевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Ахунов Роман Раисович (RU), Газизов Рустам Рифатович (RU), Газизов Александр Тальгатович (RU), Веселовский Александр Владимирович (KZ), Квасников Алексей Андреевич (RU), Носов Александр Вячеславович (KZ), Белоусов Антон Олегович (KZ), Буичкин Евгений Николаевич (KZ), Лесков Андрей Николаевич (RU), Демаков Александр Витальевич (RU), Лемешко Ксения Андреевна (RU), Собко Александр Александрович (KZ), Осинцев Артем Викторович (KZ), Калимулин Илья Фидаильевич (RU)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611481

TALGAT 2017


Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью «ТАЛГАТ» (RU)*Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2017663209

Дата поступления 13 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности Г.П. Илев

Авторы: Газизов Тальгат Рашитович (RU), Мелкозеров Александр Олегович (RU), Газизов Тимур Тальгатович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Заболоцкий Александр Михайлович (RU), Газизов Руслан Рифатович (RU), Бусыгина Анна Владимировна (RU), Лежнин Евгений Владимирович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Суровцев Роман Сергеевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Ахунов Роман Раисович (RU), Газизов Рустам Рифатович (RU), Газизов Александр Тальгатович (RU), Хажибеков Роман Русланович (KZ), Квасников Алексей Андреевич (RU), Носов Александр Вячеславович (KZ), Белоусов Антон Олегович (KZ), Тернов Станислав Анатольевич (KZ), Сагиева Индира Ериковна (KZ), Демаков Александр Витальевич (RU), Осинцев Артем Викторович (KZ), Собко Александр Александрович (KZ)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018660554

**«Аналитическая модель реверберационной камеры для
оценки напряженности электромагнитного поля в рабочей
зоне»**

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

Авторы: *Демаков Александр Витальевич (RU), Квасников Алексей
Андреевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Газизов
Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № 2018617321

Дата поступления 13 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 августа 2018 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев





**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Демешков А. В.

Колчанников М. С.

за лучший доклад на секции 2 «Электроника и приборостроение»
подсекция 2.6 «Электромагнитная совместимость»
Международной научно-технической конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР - 2017»

Председатель конференции
Ректор



А.А. Шелунагов

Томск – 2017



Диплом II степени

награждается

*Демаков
Александр
Витальевич*

за лучший доклад на
Международной научно-практической
конференции «Электронные средства
и системы управления»

секция 13 «Электромагнитная совместимость»

Председатель конференции

Ректор ТУСУРа



А.А. Шелупанов

А.А. Шелупанов

29 ноября – 1 декабря 2017 г.

г. Томск



TUSUR | TUSUR
UNIVERSITY

Диплом I степени

награждается

Демаков Александр

за лучший доклад на
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР**»

секция 2 «Электроника и приборостроение»
подсекция 2.6 «Электромагнитная совместимость»

Председатель конференции



16-18 мая 2018 г.

г. Томск

А.А. Шелупанов
А.А. Шелупанов

Ректор ТУСУРа


TUSUR UNIVERSITY
 Томский государственный университет
 систем управления и радиоэлектроники



Международная
 научно-практическая
 конференция
**«ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА
 И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»**

Диплом I степени

награждается

Демаков А. В.

за лучший доклад на
 Международной научно-практической
 конференции «Электронные средства
 и системы управления»

секция 13 «Электромагнитная совместимость»

Председатель конференции

Ректор ТУСУРа

А. А. Шелупанов

28 – 30 ноября 2018 г.

г. Томск





TUSUR | TUSUR
UNIVERSITY

Диплом II степени

награждается

Александр Демаков

за лучший доклад на
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР**»

секция 8 «Postgraduate and Master Students' Research in Electronics
and Control Systems»

Председатель конференции



А.А. Шелупанов
Ректор ТУСУРа

22 – 24 мая 2019 г.

г. Томск



20th International Conference of Young Specialists
on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices

June 29 - July 3, 2019
Erlagol (Altai Republic, Russia)

DIPLOMA

first place

awarded to

Alexander V. Demakov

for the report

**Algorithm for an Estimation of the Electromagnetic Field Uniformity in the
Working Volume of a Reverberation Chamber**

at the section

Radio and Microwave Technology. Computer Science and Telecommunications



Sergey Martynov
Program Organizing
Committee Chair



Novosibirsk State
Technical University

NETI

